

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2007

Ondřej Lukášek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 - Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 - Elektronické informační a řídicí systémy

**Využití malé větrné elektrárny pro vytápění
malých objektů**

**The use of a small windpower installation for
heating of a small buildings**

Bakalářská práce

Autor: **Ondřej Lukášek**

Vedoucí BP: Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Konzultant: Doc. Ing. Eva Konečná, CSc.

V Liberci 21. 3. 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Zadání bakalářské práce
(v tištěné podobě BP)

Anotace

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře se stavbou čtyřlísté malé prototypové větrné elektrárny o průměru rotoru 2,65 m, celkovou výškou 10 m o délce stožáru 5 m a koeficientem rychloběžnosti 4. V praxi ověřuji vhodnost větrné elektrárny pro vytápění malých objektů. Stavba elektrárny je provedena dle vlastního konstrukčního návrhu, který je podrobně popsán v konstrukční části práce. V práci uvádím četné zkušenosti z provozu větrné elektrárny, výsledky měření na elektrárně, zjištěné konstrukční nedostatky a jejich odstranění ve formě přestavby gondoly větrné elektrárny.

Vedlejším cílem je pak základní seznámení s důvody vzniku větru na naší planetě a jeho popisem. Uvést do problematiky větrných zařízení z historického a také konstrukčního hlediska. Celkově zde zhodnocuji provoz českých větrných farem. Vyjadřuji se k problematice podpory větrné energetiky ze strany státu.

Výpočtová část práce pak uvádí několik nejdůležitějších parametrů a s tím souvisejících výpočtů, které musí konstruktér znát před vlastní stavbou větrné elektrárny.

V závěrečné části této bakalářské práce zhodnocuji klady a zápory vlastní větrné elektrárny a jejího využití z hlediska podpory vytápění.

Abstract

The main purpose of this final work is to make readers acquainted with a construction of a small prototype four-bladed wind-power installation. Size of a rotor is 2.65m, size of a total installation is 10m, size of a pole is 5m and tip velocity ratio is 4.

The second purpose is to test its conveniency for heating of small buildings in practice. The wind-power installation is constructed by my own engineering design, which is closely described in the part oriented to engineering. There are described my own experience, outcomes of measurement, all known structural deficiencies and their reparations.

The third purpose is to inform readers about main reasons of wind origin and its description. It includes also summary of wind-power installation questions from historical viewpoint and an estimation of both its activity in the Czech republic and government support.

There are mentioned the most important parameters in the part oriented to calculations. According to them there are mentioned calculations, which had to be completed before the main construction.

In conclusion there are given advantages and disadvantages related to completed construction.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

23.3. 2007

Ondřej Lukášek

Poděkování

Na této stránce bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří mě podporovali při stavbě malé větrné elektrárny a při tvorbě této práce.

Především mému otci, který pro mě zhotovil dle mého návrhu a dostupných možností některé díly pro zařízení větrné elektrárny. Především náboje ložisek a hlavního hřídele rotoru.

Dále zbytku rodiny, která byla celé léto a podzim obtěžována hlukem, který vznikal při mnohačetných úpravách různých materiálů.

Děkuji panu prof. Ing. Aleši Richterovi, CSc. pracovníku Fakulty mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, za to, že se ujal funkce vedoucího mé bakalářské práce.

Poděkování patří také všem lidem vyjadřujícím svojí podporu prostřednictvím internetové stránky www.vetrnaelektrarna.wz.cz, kde tuto vlastní stavbu prezentuji.

Přílohy

A1: Vybrané fotografie stavby malé větrné elektrárny

A2: Fotografie ovládacího panelu

B1: Fotografie malé větrné elektrárny

Obsah příloženého CD

- **BP_VE.pdf** - elektronická podoba práce ve formátu PDF
- vybraná fotodokumentace stavby a provozu větrné elektrárny
- videosoubory ve formátu MPG zachycující větrnou elektrárnu v provozu

OBSAH

Obsah	8
Úvod	9
1 Teoretická část	10
1.1 Vznik větru.....	10
1.2 Beaufortova stupnice síly větru.....	10
1.3 Větrný atlas ČR	11
1.4 Základní dělení VE	12
1.4.1 Dělení VE dle výkonu	12
1.4.2 Dělení VE dle koncepce.....	13
1.5 Historie vzniku VE.....	13
1.5.1 Historie VE ČR.....	15
1.6 Zhodnocení provozu VE na našem území	16
1.6.1 Větrná farma Nový Hrádek	16
1.6.2 Celkové zhodnocení provozu českých VE, podpora VE státem	17
1.7 Stavební právo	18
2 Výpočtová část	19
2.1 Parametry stavby VE	19
2.2 Výkon větru.....	19
2.2.1 Příklad výpočtu výkonu větru působícího na vlastní konstrukci VE.....	19
2.3 Koeficient rychloběžnosti rotoru.....	20
2.3.1 Stanovení koeficientu rychloběžností vlastní konstrukce rotoru VE.....	21
2.4 Ideální tvar lopatky rotoru.....	21
2.5 Účinnost větrného zařízení	22
2.5.1 Výpočet celkové účinnosti vlastní konstrukce VE.....	23
3. Stavba malé VE	24
3.1 Stojan stožáru	24
3.2 Stožár	25
3.3 Gondola	27
3.3.1 Asymetrická regulace proti nadměrným účinkům větru	27
3.3.2 Náboj rotoru.....	28
3.3.3 Rám gondoly.....	28
3.4 Rotor.....	29
3.4.1 Konstrukce rotoru.....	30
3.4.2 Lopatky rotoru.....	30
3.5 Instalace VE na stanoviště	31
3.5.1 Ukotvení stožáru.....	31
3.5.2 Zemní kotvy.....	32
3.5.3 Kotvicí lana	33
3.6 Instalace gondoly	34
3.7 Vztyčení a úpravy	34
3.8 Elektrická instalace	35
3.8.1 Elektrické schéma zapojení konstrukce VE	36
3.9 Uvedení do provozu, zkušební doba	38
4 Přestavby provedené na VE	40
4.1 Přestavba regulace proti nadměrným účinkům větru	40
4.2 Přestavba převodů.....	40
4.3 Nová montáž na stanoviště	41
5 Zhodnocení provozu elektrárny po přestavbě	42
5.1 Naměřené hodnoty	42
5.2 Zhodnocení možnosti použití elektrárny pro vytápění	45
Závěr	45
Přílohy	

ÚVOD

O nápadu postavit si svojí vlastní větrnou elektrárnu jsem uvažoval a přemýšlel již od svých dětských let. Teprve s rozvojem mých znalostí z oblasti strojírenství a elektrotechniky, získaných studiem SPŠ v Novém Městě nad Metují a později liberecké Fakulty mechatroniky a mezipředmětových studií jsem se rozhodl tento nápad zrealizovat. Velkým impulsem pro zahájení stavby, pro mne byl také fakt, že získané poznatky a znalosti zpracuji při tvorbě bakalářské práce.

Po důkladném studiu dostupné domácí literatury jsem v červnu roku 2006 nakreslil první konstrukční návrh a začal shánět díly potřebné pro stavbu. Už tehdy mi bylo jasné, že celou stavbu provedu jako nízkonákladovou. Důraz jsem kladl především na bezpečnost veškerých dílů větrné elektrárny a kompletního celku. Při stavbě jsem použil repasované a upravené díly pro potřeby mé budoucí větrné elektrárny (v dalším textu již pouze zkratka VE). Budoucí stanoviště větrné elektrárny jsem dlouho vybírat nemusel. Na naší zahradě se nachází 5 m vysoká konstrukce nádrží pro akumulaci dešťové a užitkové vody, která je vhodně dimenzovaná i pro instalaci VE. Na tomto místě byla elektrárna v konečné fázi nainstalována. Stalo se tak v prosinci roku 2006. Elektrárna zde spolehlivě pracuje dodnes. Bez nutností zásadních oprav a servisních zásahů přestála i několik silných vichřic v prvním čtvrtletí roku 2007. Tento fakt připisuji pečlivému technologickému postupu při výrobě jednotlivých dílů a součástí.

Elektrárna je řízena pouze mechanicky ocasním kormidlem, v jehož čepu je umístěno zařízení pro regulaci proti nadměrným účinkům větru. Elektronickou regulaci celku pro takto malou VE považuji za zbytečnou.

Energickou energii, kterou elektrárna dodává dále přeměňuji především na teplo, a proto jsem se rozhodl po finální dostavbě elektrárny zhodnotit její využití také z hlediska vytápění malých objektů. V mém případě dílny a prostor sousedícího skleníku, oba o přibližné výměře 15 m². Své získané poznatky jsem shrnul v závěrečných kapitolách bakalářské práce.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Vznik větru

Vítr byl vždy nedílnou součástí naší země, jde o energii, která nic nestojí. Nevýhodou této energie je to, že vítr není časově lineárně dostupnou energií. Intenzita (síla) a jeho směr se neustále mění a proto je relativně nevýhodnou energií. Tyto rozdíly chování větru způsobuje zemská rotace a sluneční energie, které jsou důvodem vzniku rozdílných větrů.

Vítr vzniká tak, že nad pevninou, která je ohřátá slunečními paprsky, vzrůstá teplota a tím se roztahuje vzduch. Nad mořskou plochou se vzduch také ohřívá, ale daleko méně. Výsledkem je vznik rozdílu tlaků pevninského a oceánského vzduchu, a to způsobuje proudění. Nad mořskou hladinou začíná vát vítr směrem na pevninu. V nočních hodinách je tento efekt opačný z důvodů obrácených změn teplot vzduchu. Pevnina se totiž daleko rychleji ochlazuje než vodní hladina. Vzduch tedy neustále proudí z území s vysokým tlakem na území s tlakem nižším.

Zemská rotace má pak vliv na vznik pasátů, tzv. „nekonečných větrů“. Na proudění větru má také vliv zemský povrch - hory, kopce, dřeviny a stavby. Z důvodů těchto rozlišných charakterů větru na Zemi časem vznikla k popisu síly a jeho charakteru Beaufortova stupnice síly větru.

1.2 Beaufortova stupnice síly větru

Beaufortova stupnice síly větru slouží k určení síly větru a jeho charakteru a je celosvětově uznávaná. Sestrojil ji v letech 1805 - 1808 britský kontraadmirál sir Francis Beaufort (1774 - 1857). Původně umožňovala odhad rychlosti větru dle vlnění mořské hladiny. Stupnice je praktická, nevyžadovala použití přístrojů. Rychlost větru se podle této stupnice měří buď na moři dle odhadu výšky vln a nebo na volném terénu ve výšce 10 m nad zemí pomocí anemometrů.

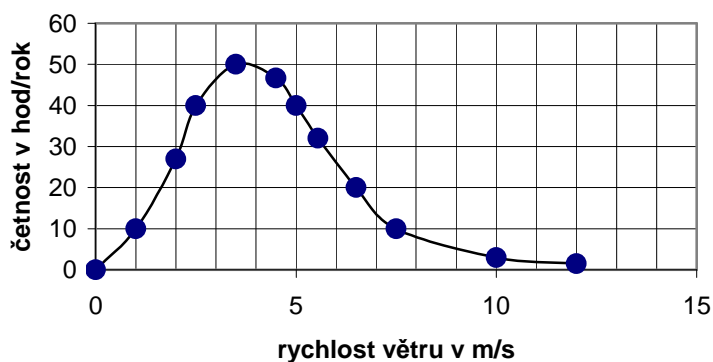
síla větru	rychlost v m/s	typ větru (označení)	charakter na souši	charakter na moři	výška vln na moři v m
0	0 - 0,2	bezvětří	kouř stoupá kolmo vzhůru	zrcadlo	< 0,03
1	0,3 - 1,5	vánek	směr větru ukazuje pohyb kouře	malé vlnky	asi 0,1
2	1,6 - 3,3	slabý vítr	vítr je cítit ve tváři, vítr hýbe s listím stromů	světlejší hřebety vln	asi 0,15
3	3,4 - 5,4	mírný vítr	listy a menší větve stromu v trvalém pohybu	lom vln	0,3 - 0,7
4	5,5 - 7,9	dostí čerstvý vítr	zvedá se prach a malé části papíru létají vzduchem	místa bílé hřebeny	0,6 - 1,2
5	8,0 - 10,7	čerstvý vítr	menší stromy se začínají ohýbat	nad vlnami vodní tříšť	1,2 - 2,4
6	10,8 - 13,8	silný vítr	použití deštníku je nesnadné, vítr pohybuje silnými větvemi	silná vodní tříšť	2,4 - 4
7	13,9 - 17,1	prudký vítr	vítr pohybuje celými stromy, chůze proti větru je nesnadná	bílá pěna na vlnách	4 - 5
8	17,2 - 20,7	bouřlivý vítr	vítr láme větve stromy, znemožňuje chůzi proti němu	velké množství bílé pěny na vlnách	5 - 6
9	20,8 - 24,4	vichřice	vítr způsobuje menší škody na stavbách - především pády střešních krytin	vysoké rolující vlny	asi 6
10	24,5 - 28,4	silná vichřice	vítr vyvrací stromy všech typů, silné škody na stavbách	přepadající hřebenatky	6 - 9
11	28,5 - 32,6	mohutná vichřice	ničivé účinky mohutných rozměrů	vlny pokryté penou	> 14
12 - 17	> 32,7	orkán	zpuštění velkého charakteru, ve vnitrozemí zřídka	vlnobití, pěna ve vzduchu	> 14

Tab1-1: Beaufortova stupnice síly větru

1.3 Větrný atlas ČR

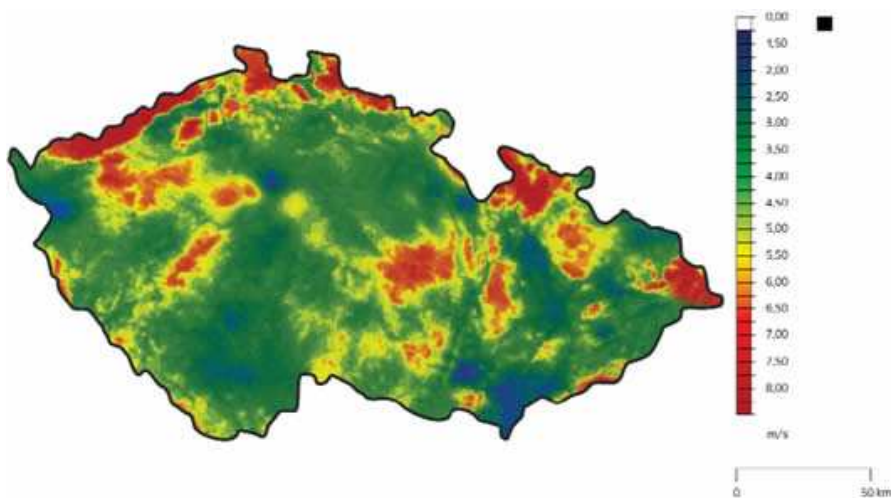
Z dlouhodobě naměřených hodnot v dané lokalitě se vypracuje četnost výskytu rychlostí větrů a spočítá roční aritmetický průměr rychlosti větru, podle kterého se posuzuje vhodnost dané lokality pro stavbu a provoz větrné elektrárny.

Příklad rozdělení četnosti různých rychlostí větru



Obr. 1-1: Příklad četnosti výskytu různých rychlostí větru

Z plošně získaných údajů o síle větru na území určitého státu se vypracovává větrný atlas. Který jednotlivým územím dané země přiřazuje průměrnou rychlost větru.



Obr. 1-2: Větrný atlas ČR

Za vhodné lokality pro výstavbu VE jsou považované oblasti s ročním průměrem rychlosti větru vyšším než 5,5 m/s. Jak je patrné z obr. 1-2, nejlepšími místy pro výstavby VE jsou naše příhraničí. Tato místa mají relativně vyšší nadmořskou výšku. Ta s sebou ale přináší problémy s provozem těchto zařízení v zimních měsících. Výrobci a provozovatelé VE zde často bojují s námrazou jednotlivých částí svých zařízení. Nejčastějším problémem bývá pak námraza anemometru, který slouží pro získávání vstupních hodnot (rychlost a směr větru) pro řídicí systém větrné elektrárny. Tyto problémy se nejčastěji řeší zavedením vnitřního vyhřívání těchto zařízení.

Moje větrná elektrárna je z hlediska větrného atlasu ČR postavena na nevhodném místě. Při nadmořské výšce asi 320 m nad mořem zde průměrná roční rychlost větru dosahuje hodnoty 2,9 m/s. Tato hodnota je považována jako krajně nevhodná pro výstavbu VE jakýchkoliv rozměrů.

1.4 Základní dělení VE

Základní rozdělení elektráren je do tří skupin. Tyto skupiny vznikly tím, že větrná zařízení můžeme dělit podle několika hledisek.

1.4.1 Dělení VE dle výkonu

Podle dosaženého nominálního výkonu se VE dělí obecně do tří skupin.

- První skupinou jsou obvykle malé VE, jejichž výkon nepřesahuje 20 KW. Zde by se mohlo zdát, že zařízení, které má tak velký výkon, již nemůže spadat do této skupiny. V dnešním moderním měřítku, kdy je obvyklý nominální výkon velkých větrných elektráren 2-5 MW, nesmíme o této hodnotě však pochybovat. Nejmenší větrné elektrárny jsou výhodné především v místech bez přípojky elektrické sítě. Tyto větrné elektrárny se dle svého výkonu používají jako nabíječe akumulátorů nebo jako zařízení pro pomocné vytápění. Elektrická energie se obvykle vyrábí pomocí synchronních generátorů buzených permanentními magnety s výstupním napětím 12 nebo 24 V. Dále je za pomoci měničů napětí transformována na obvyklých síťových 230 V. U větších zařízení s výkonem nad 5 KW svého výkonu lze již přemýšlet o vlastním zásobování elektřinou nebo hlavním vytápění budov. Rovněž je tento výkonový potenciál vhodný k ohřevu vody. Maximální průměr rotoru se zde pohybuje na hranici 10 m, s možnou výškou stožáru 15 m.

- Druhá skupina „středních“ elektráren má svůj výkonový rozsah 20 až 50 KW. Spadá do ní mnoho dnešních konstrukčních řešení VE, které jsou nabízeny soukromým subjektům. Většina těchto elektráren pracuje na farmách nebo malých firmách a podílejí se zde na samozásobování elektřinou či vytápění komplexu budov. V této výkonové třídě je na trhu VE asi největší výběr možných konstrukčních řešení jednotlivých výrobců. K rozměrovým vlastnostem této třídy patří rotor se svým maximálním průměrem 20 m a výškou stožáru maximálně 30 m.

- Třetí skupinou rozumíme „velké“ VE. V poslední době se jedná o nejvíce rozvíjenou a propagovanou skupinu VE mezi širokou veřejností. Výkonově je tato třída stanovena jako zařízení s nominálním výkonem převyšujícím hranici 50 KW. Dnešní měřítka těchto zařízení jsou ovšem naprosto kolosální. Běžnými parametry jsou výška tubusu 100 m a stejně tak i velký průměr rotoru. Tyto zařízení jsou tak v místě své instalace naprosto nepřehlédnutelnými giganty, a proto jsou také dobře známé mezi širokou veřejností, což se o menších elektrárnách se svojí velikostí „skromností“ říci nedá. Rovněž nominální výkon těchto zařízení dosahuje na poměry VE dozajista nevídaných hodnot. Pomatuji dobu před deseti lety, kdy byly běžné elektrárny z této skupiny osazovány generátory o maximálním výkonu 400 KW. V dnešní době je ovšem nejčastějším nominálním výkonem hodnota okolo 2 MW a zpravidla vyšší. V západních přímořských zemích se můžeme setkat s běžně používanými elektrárnami o výkonu atakujícím hodnotu 5 MW. Na výrobu elektřiny je použit asynchronní generátor, který dodává střídavé napětí o velikosti 660V. Většina starších elektráren má konstantní otáčky generátoru, modernější typy mají obvykle dvě rychlosti otáčení. Existují i elektrárny se speciálním mnohápólovým generátorem, který nevyžaduje převodovku, která bývá společně s rotorem největším zdrojem vyvozovaného hluku.

1.4.2 Dělení VE dle koncepce

V této koncepční skupině dělíme elektrárny dle svislé či vodorovné osy otáčení vlastního rotoru. Jedná se o to, jakým způsobem vítr na rotor působí. Buď tedy vztlaťově nebo klasicky odporově. Většina z nás zná pouze klasické VE známé jako stožár, na jehož vrcholu je umístěna gondola a na té se kolmo k zemi otáčí rotor. Tento koncepční typ je hojně rozšířen a dále zdokonalován, protože jde o konstrukčně dobré a osvědčené řešení.

V historii se však našlo pár konstrukčních řešení, které uplatňují vodorovnou orientaci rotoru k zemi. Jednalo se většinou o prototypové výrobky, s rotory jedinečnými svojí funkcí a koncepcí, a proto ne vždy technologicky dobře zvládnutelné. Z historie tak můžeme například uvést typ VE Savonius a Darrieuxův rotor ve tvaru velkého písmene H. Tento typ „vodorovného“ rotoru však skýtal své nedostatky v potřebě vyvážení velké hmoty rotoru, což bylo v praxi prakticky nemožné. Proto se toto koncepční řešení potýkalo s problémy souvisejícími s kmitáním a vibracemi. Tento typ řešení rotoru dle [2] také jistou dobu používali vědci v Kalifornském Parku větrných mlýnů. Jednu podstatnou výhodu tato řešení představovala. Generátor s případnou převodovkou mohl být nainstalován na zemi a s rotorem spojen dlouhou hřídelí. To umožňovalo snadnost různých servisních zásahů a snižovalo hmotnost vlastní gondoly VE. Další výhodou elektráren pracujících na vztlaťovém principu je, že mohou dosahovat vyšší rychlosti otáčení a tím i vyšší účinnosti. Není je třeba natáčet do směru převládajícího větru.

Poslední dobou se v nabídkách některých firem začínají tyto koncepce znovu objevovat s tím, že se jedná o revoluční typy nových větrných elektráren. Až čas a případné první zkušenosti s těmito typy rotorů VE ukáží, zda měla tato tvrzení pravdu.

V rozdělení větrných zařízení ještě můžeme nalézt další skupinu dělení. A to například na elektrárny vrtulové či lopatkové. Zde se spíše jedná o rozdělení historické. Lopatkové typy rotorů se spíše než jako elektrárny používaly na divokém západě jako hnací součásti vodních čerpadel a často proto dostávají i přídomek „westernová“ vodní kola. I když nevylučují využití i pro výrobu elektřiny, jedná se zde především o známé konstrukční řešení nazývané Kukate, které je velice oblíbeno u domácích kutilů v sousedním Německu viz. [2].

1.5 Historie vzniku VE

Důvodem vzniku větru je zemská rotace a vliv slunečního záření, tyto dva faktory způsobují ve svém důsledku proudění vzduchu na celé naší zeměkouli. Odhaduje se tak, že maximální možný využitelný výkon takového větru celkově přesahuje hodnotu 26.000 TWh ročně.

Tento fakt si již uvědomovali Egypťané na svých námořních cestách zhruba 5.000 let před naším letopočtem. Je dokázáno, že již tehdy používali primitivních plachet pro usnadnění cestování jejich lodí.

Prvními prakticky využitelnými stroji se však staly známé větrné mlýny. Je známo, že v Persii a Číně tyto zařízení s úspěchem používali tamní obyvatelé již v sedmém století. Nositeli technologie stavby větrných mlýnů se v této době stávají ale Arabové. Díky nim objevuje v 10. století první větrný mlýn ve Španělsku. Do dalších evropských zemí se dostávají větrné mlýny na přelomu 12. a 13. století. Největší rozmach zaznamenávají větrné mlýny na vrcholu 16. století, kdy můžeme hovořit o 60.000 postavených a funkčních větrných mlýnech.

Pro státy, jako jsou Dánsko či Nizozemí, se postupně tyto stavby stávají typickými a známými pro okolní svět. Ostatní státy západní Evropy ovšem tak rychle na rozvoj větrných mlýnů zpočátku nezareagovaly. V průmyslových státech, jako byla Anglie a Německo, se stále energie vyráběla za pomoci spalování černého a hnědého uhlí.

Proto je velice zajímavým faktem, že právě v Holandsku byly hlavním zdrojem vyprodukované energie větrné mlýny a jim podobná zařízení. Odhaduje se tedy, že kolem roku 1900 mohl být výkon všech větrných mlýnů v Holandsku okolo 1.000 MW.

Větrné mlýny ve své podstatě už v této době nesloužily jenom k mletí obilí. Především v Nizozemí se jejich principu využívalo s úspěchem také ke zpracování cukrové třtiny, k zavlažování a v neposlední řadě k potřebnému odčerpávání vody.

Prvním mužem, který se vážně zabýval myšlenkou vyrábět „pomocí větru“ elektřinu a který zřejmě také jako první na světě zhotovil větrný motor vyrábějící elektrický proud, byl Poul la Cour (1846-1908) viz. [2]. Stalo se tak v roce 1891. Vyrobený proud používal pro elektrolýzu ve své škole. V tomto roce obdržel výzkumnou zakázku na téma „použitelnost síly větru pro zemědělství a řemeslné účely“. Ve svém vlastním „větrném kanále“ zkoumal odpor vzduchu u těles rozličných tvarů a velikostí ploch. Tím objevil, že vzduchový odpor je roven velikosti plochy a nárůstu se čtvercem rychlosti proudění. La Cour i dále zkoumal existující lopatky větrných mlýnů a čerpadel a optimalizoval jejich tvar podle svých zjištěných poznání při jednotlivých aerodynamických pokusech.

Důležitým objevem se v této době stal pokus jachtaře Lilienthala viz. [2]. Nechal otáčet kolem svislé osy pokusné plochy plachty lodě, které byly upevněny na patřičné lati, a byl tak nezávislý na přirozeném větru. Tento svůj objev nazval vzdušný šroub a díky tomu objevil také četné výhody zakřivených lopatek rotoru.

V době vědeckoprůmyslové revoluce přichází období páry a parních strojů. S rozvojem metalurgie vstupují na pole větrných zařízení další možnosti jejich využití, protože do této doby bylo hlavní stavební surovinou pouze dřevo. Všechna tehdejší větrná zařízení pracovala na odporovém principu. Tzn. vítr se opírá do lopatky, která mu klade odpor a tím se vyvíjí síla otáčející rotorem. Účinnost takového rotoru byla velmi nízká a zdaleka nedosahovala ani 20 %.

Dalšími důležitými kroky v budování větrných zařízení byla díla Alberta Betze (1926) „Větrná energie a její využívání“ a Karla Bila (1926) „Síla větru v teorii a praxi“ viz. [2]. Oba dva tito vědci a inženýři spolu úzce spolupracovali. Byli si jisti přínosem větrné energetiky pro lidstvo. Tyto publikace představovaly čtenáři základy aerodynamiky, teoretické základy a praktické příklady pro konstruktéry a stavebníky.

Pracovní stoje již nebyly pouze mlýny, byly univerzální. To znamenalo, že výkon rotoru byl přenášen za pomoci kuželového soukolí a dlouhé hřídele k patě stožáru. Zde mohlo být nainstalované libovolné zařízení – generátor, čerpadlo, aj. To ve 30. letech vedlo ke konstrukci větrných motorů pracujících na vztakovém principu, kdy vítr obtéká lopatku, který má profil podobný letadlové vrtuli. Účinnost rotoru větrného zařízení této konstrukce může převýšit i 50%. Aby mohla být energie větru takto využita, musí rychlost lopatek mnohonásobně převyšovat rychlost větru. Proto mívají tato větrná zařízení pouze jedno nebo dvě lopatky svého rotoru, což zaručuje celkovou rychloběžnost daného rotoru. Takovéto konstrukce se začaly objevovat v době druhé světové války a jejich výstavba vrcholila v 50. letech, kdy se objevily v mnoha zemích světa.

Důležitá část historie VE se odehrávala v 80. letech v Kalifornii, kde byla v průmyslu San Geronimo vybudována jedna z prvních větrných farem na světě se 4.000 turbínami, které jsou funkční dodnes. Později byly v USA budovány další četné větrné farmy. Jejich výkony se velmi různí, od několik stovek KW u těch malých, až po ty gigantické, jako jsou např. v průmyslu Tehachapi. Tento průmysl patří mezi největrnější místa na zeměkouli, a tak zdejší větrná farma dosahuje ročního výkonu 1,3 TWh.

K nařízení osy rotoru směrem proti větru sloužilo u těchto elektráren postranní větrné kolo a ocasní kormidlo. V pozdějších případech se s úspěchem začíná objevovat natáčení za pomoci elektromotoru. Toto natáčení je řízeno anemometrem, umístěným

většinou na vrcholu gondoly. Zařízení většinou obsahuje mikropočítač, či počítač, který se stará o chod elektrárny a její diagnostiku. Vstupním údajem tohoto zařízení je síla rychlosti větru a jeho aktuální směr. Zařízení tedy vždy ověří možnosti využití daného typu větru a poté nastaví všechny důležité prvky elektrárny, jakými jsou brzda, natočení jednotlivých lopatek, natočení rotoru proti větru, případně potřebu roztočení rotoru pomocným motorem.

Tyto potřeby „řízení“ VE odstraňují konstrukce větrných rotorů se svislou osou otáčení. Průkopníkem tohoto typu VE, do té doby nevídané konstrukce, se stal v roce 1930 Francouz George Darreus. Veřejnost tehdy tomuto typu řešení a jim ostatním nepřikládala velký význam. Teprve energetická krize počátku 70. let oprášila i systém Darius v podobě, jaká odpovídala tehdejšímu rozvoji techniky.

Svislý rotor této doby míval zpravidla 2 nebo 3 listy v příčném řezu tvarované opět jako letecký profil. K dalším výhodám tohoto systému patří to, že odpadá nákladná konstrukce otočné gondoly a generátor je umístěn na zemi, takže se snadno udržuje. Ke spuštění se musí použít pomocný elektromotor.

Množství dnešních větrných elektráren exponenciálně stoupá. V USA je celkový instalovaný výkon těchto elektráren téměř 2 TW, v Dánsku 0,5 TW, v Německu 350 MW. Za posledních 10 let jich bylo vybudováno ve světě více než 20.000. A to i přesto, že stupeň využití těchto elektráren je poměrně nízký. Výše uvedená účinnost přes 50% je účinnost vlastního zařízení. Když však vezmeme v úvahu, že činnost a výkon elektrárny jsou závislé na existenci a vhodné intenzitě větru, je plné využití elektrárny zaručeno pouze 12-16% z doby ročního provozu. Toto vede k nepříznivému poměru pořizovacích a provozních nákladů na straně jedné a vyrobených KWh na straně druhé.

Američtí odborníci systematicky rozpracovali široký soubor souvisejících otázek. Zahrnuli do něj nejen techniku a technologii, ekonomiku a energetiku, ale také sociologii a ekologii, stejně jako právní stránku věci a problematiku veřejného mínění. Vycházeli z faktu, že už koncem minulého století pracovalo v USA kolem šesti milionů malých větrných elektráren, čerpadel a dalších zařízení. Výhodou USA je i velké množství rozlehlých oblastí s velmi dobrými větrnými podmínkami.

Technologii větrných elektráren se podařilo nejdále dovést v Dánsku, v zemi, kde vítr vane 300 dnů v roce. Podle některých údajů pochází každá třetí větrná elektrárna na světě od dánského výrobce viz. [1]. V zemi pracuje více než 3.000 agregátů, které představují přes 7 % instalovaného světového výkonu větrných elektráren. Dánové se rozhodli pro masivní státní podporu tohoto obnovitelného energetického zdroje, jenž by měl v roce 2010 pokrývat dokonce až 13 % celostátní spotřeby elektrické energie. Podobný úmysl naznačuje také Velká Británie, kde větrný potenciál překračuje, dle několika studií, údajně až sedminásobek celkových energetických potřeb. Podobný vývoj a trend je v dnešní době patrný i u našich sousedů v Německu a Rakousku.

1.5.1 Historie VE ČR

Na našem území se větrná energie využívala v minulosti pouze pro účely mletí obilí ve větrných mlýnech. Historicky je postavení prvního větrného mlýna na území Čech, Moravy a Slezska doloženo v roce 1277 v zahradě Strahovského kláštera v Praze. Svědčí o tom také asi 260 zcela nebo částečně zmapovaných lokalit, kde dříve stávaly větrné mlýny. První větrné elektrárny u nás vznikaly se střídavými úspěchy koncem 80. let minulého století. Pro tehdejší centrální úřady byl vypracován a později upřesňován odhad větrného potenciálu tehdejšího Československa. Prozatím největší rozmach VE proběhl v letech 1990-1995 a od té doby bohužel stagnuje.

V současné době velké větrné elektrárny pracují na desítkách lokalit v ČR. Nominální výkon se pohybuje od 75 KW až po 2 MW. Jejich výrobci jsou jak české firmy, tak dodavatelé z Dánska, Německa, Rakouska a Itálie. Z VE postavených v minulém desetiletí je v plném nebo částečném provozu 8 elektráren s celkovým výkonem 2.400 KW. Demontováno bylo 5 VE s celkovým výkonem skoro 1 MW, mimo provoz je 11 VE o celkovém výkonu téměř 5 MW.

1.6 Zhodnocení provozu VE na našem území

1.6.1 Větrná farma Nový Hrádek

Nejbližší stavbou velkých větrných elektráren v mém bydlišti je větrná farma Nový Hrádek, která se nachází asi ve vzdálenosti 20 Km. Na příkladu této větrné farmy, která je dnes nefunkční, bych vám chtěl přiblížit, proč má nyní ČR sestupnou tendenci v rozvoji a modernizaci VE.

Elektrárny v této lokalitě vystavěla v roce 1995 firma Alvyen. Již původní stavbu provázely komplikace. Základní problém spočíval v tom, že se zvolila česká technologie Vítkovických železáren, která nakonec nebyla dodána. Protože byly v této době hotovy základy pro 5 VE, rozhodl se stavitel použít jako náhradní řešení výrobky české firmy Ekov. Ty pasovaly na vyhotovené základy. Jednalo se ovšem o prototypové neodzkoušené výrobky. Problém byl v tom, že nejbližší obytná zástavba byla ve vzdálenosti přibližně 200 m. Postaveny byly 4 elektrárny o výšce tubusu 30 m a shodném průměru rotoru z původních pěti navrhovaných. Po výstavbě se ladila jak elektrická, tak mechanická část. Jednotný nominální výkon generátoru byl stanoven na 400 KW při napětí 400 V.

Rada problémů se vyskytla s rotory, měnil se úhel náběhu listů rotorů. V důsledku kolize listů rotoru s tělem tubusu došlo k mechanickému poškození listů a dokonce jeho ulomení z rotorové hlavy. Docházelo k „přetáčení“ elektrárny, kdy okamžitý výkon přesahoval jedno-násobek výkonu nominálního. Společnost Ekov k potlačení tohoto efektu následně namontovala na rotorové listy příruby, které umožňují mechanicky nastavitelnou změnu úhlu listů a tím snížení nominálního výkonu při nárazech větru. Zkušební provoz farmy byl povolen Stavebním úřadem Náchod do 30.9.1997, nebyl však využit pro vysokou hlučnost (v nočních hodinách musela být farma odstavena). Po uvedeném termínu nebyla stavba zkolaudována a nemohla tedy být trvale provozována.

Na případné opravné požadavky přestala společnost Ekov reagovat. Od roku 1999, kdy se prakticky farma stala majetkem VČE, a.s., byly zahájeny opravy nedostatků, z větší části vlastními pracovníky VČE. Pracovalo se především na důkladném odhlučnění gondol a jednotlivých převodových skříní, kde se vymezovaly všechny provozní vůle. Po elektrické stránce je vše v pořádku.

Dalším zkušebním provozem bylo zjištěno, že elektrárny stále nevyhovují hlukovým předpisům a trpí problémy spojenými s nedostatky převodových skříní, proto nedostaly v roce 2000 povolení k provozu a od té doby zařízení stojí a celkově chátrá. V nejbližší době by měla být tato větrná farma demontována a zrušena.

Náklady na celkovou výstavbu farmy byly v roce 1995 35 miliónů korun. Dalšími měřeními bylo zjištěno, že daná lokalita není vhodná pro výstavbu takto velkých VE o celkovém nominálním výkonu lehce převyšujícím hranici 1,5 MW. Dle posledních měření bylo zjištěno, že plný výkon stávající farmy by byl zajištěn pouze 18 % roku provozu elektrárny.

1.6.2 Celkové zhodnocení provozu českých VE, podpora VE státem

Na příkladu farmy Nový Hrádek a jí podobných po celé ČR jsem chtěl ukázat počáteční „porevoluční“ nadšení jednotlivých investorů, kteří svoje peníze nainvestovali do prototypových zařízení vyráběných v Čechách (Vítkovice, Ekov). Většinou byly tyto české výrobky cenově dostupnější, a proto se rozhodli právě pro ně. Dalším důvodem mohl být i fakt snadného a relativně levného „domácího“ servisu těchto elektráren. Výsledkem jejich rozhodnutí je to, že tyto farmy až na malé výjimky dnes stojí bez užitku nebo byly již dávno demontovány. Jejich návratnost je nulová a dnes slouží jako smutné pomníky počátečního nadšení.

Naopak investoři domácí, kteří zvolili technologii ze západní Evropy, která byla léty prověřená, a ti, kteří k nám přicházeli v době hojné výstavby ze zahraničí a též si s sebou přinesli dávno odzkoušenou a vyladěnou technologii a postavili zde své farmy, profitují s relativně dobrými výsledky svých zařízení dodnes. Tito stavebníci s sebou přinesli i kvalitní způsoby měření vhodnosti lokalit pro výstavbu VE. Jejich farmy se nacházejí na výhodných místech. Za zmínku stojí především dánské firmy se svými hlavními představiteli na našem území Vestas a Wind Power, které patří společně s americkými výrobci ke světové špičce. To lze i jednoduše zjistit z celkových každoročních závěrečných zpráv o stavu VE na našem území a také tak, že nové elektrárny jiných značek než Vestas se u nás prakticky v současné době nestaví. Dnešní bilance VE na našem území je tedy velmi zarážející. Celkově je v plném nebo částečném provozu 8 elektráren s celkovým výkonem 2.400 KW, demontováno bylo 5 VE s celkovým výkonem skoro 1 MW, mimo provoz je 11 VE o celkovém výkonu téměř 5 MW.

Druhou stranou mince je ale podpora obnovitelných zdrojů energie ze strany státu, která je u nás ve srovnání se západní Evropou téměř nulová. Chápu, že naše země nemá v tomto směru ideální podmínky, přeci jenom nejsme na rozdíl od Dánska a Nizozemí přímořský stát s 300 větrnými dny v roce. Rovněž spád řek je na našem území minimální a nemáme potřebnou vodní zásobu pro konstrukci velkých vodních elektráren. Stát tedy nemá, dle mého osobního názoru, zájem podporovat něco, z čeho nebude mít „užitek“. Proto se v odborných kruzích mluví v souvislosti s četným zánikem domácích VE o tzv. „paradoxu českém“. Zatímco v ostatních státech EU roste rozvoj obnovitelných zdrojů energie téměř exponenciálně, tak v našich domácích poměrech téměř exponenciálně klesá.

Co se týče umístění větrných elektráren, najdou se u nás velice příznivá místa pro jejich výstavbu. Především tedy v hraničních oblastech ČR s vyšší nadmořskou výškou, například Krušnohoří. To dokazuje i větrný atlas ČR, který udává průměrnou sílu větru v průběhu jednoho roku. Pro potřeby stavby velké VE se sestavuje takový atlas hned v několika výškách nad zemí, obvykle v 10 a v 30 m. U mnoha farem docházelo v dřívějšku bohužel k nadhodnocení těchto údajů a po několikaměsíčním neefektivním provozu elektráren se obvykle na tento nesprávný fakt přišlo. Problém nebyl ani tak v tom, že by lokalita byla naprosto nevhodná, ale spíše, že nainstalované výkony generátorů převyšovaly možnosti dané lokality.

Určitým řešením této sestupné tendence by mohla být určitá intervence státu v podobě zvýšení výkupních cen takto vyrobené energie a státní dotace nejen do sektoru VE. To ovšem za momentálního vysoce deficitního státního rozpočtu nepřichází, dle mého názoru, v úvahu. Až čas tedy ukáže, kam se větrná energetika na našem území bude celkově směřovat.

1.7 Stavební právo

Jakožto každá stavba postavená na území ČR, podléhá i stavba větrné elektrárny v jakémkoliv měřítku potřebám schválení stavebního povolení. Ani pro malé elektrárny s průměrem rotoru do 3 m nestačí pouze podat příslušné oznámení malé stavby místnímu úřadu, protože větrná elektrárna je svým způsobem specifické zařízení.

Nutno podotknout, že ČR nemá v legislativním směru žádný pořádný stavební a územní zákon pro výstavbu takto specifických staveb. Na vlastní kůži jsem si vyzkoušel jaké těžkosti provázejí konstruktéra při vyřizování patřičných povolení. Chtěl jsem totiž, aby i má malá větrná elektrárna byla pod příslušným stavebním povolením. Navštívil jsem nejprve místní obecní úřad v mém bydlišti, kde mě po sdělení, že chci stavět větrnou elektrárnu, okamžitě poslali na příslušný městský úřad. Tam jsem se dozvěděl, že potřebné stavební povolení vydají jenom v případě kladných vyřízení dalších povolení z hygieny a stavebního úřadu, který se zabývá zásahy do krajinného rázu. Rovněž jsem byl informován, že se za tyto jednotlivé zprávy musí zaplatit příslušný poplatek. Tato řízení jsou nepříjemně zdoluhavá. Po tomto zjištění jsem odešel ze stavebního úřadu s velkým zklamáním.

Ve většině Spolkových zemí sousedního Německa podléhají malé větrné elektrárny s průměrem rotoru do 3 m a výškou stožáru nepřevyšujícím hranici 10 m pouze povinnosti ohlášení stavby.

Proto se nesmíme divit, že většina malých větrných elektráren na území ČR je postavena „načerno“. Po prozkoumání příslušných stavebních zákonů jsem tedy alespoň uspěl s tím, že jsem svojí stavbu ohlásil jako přenosnou a krátkodobou, která vyhovuje paragrafu 56 stavebního zákona. Moje zařízení je v podstatě postaveno tak, že může být kdykoliv demontováno ze svého stanoviště a přesunuto jinam, takže této verzi zákona vyhovuje. V čem ovšem nevyhovuje, je maximální výška zařízení, která je stanovena jako 4,5 m. Rovněž nesmí být v ohlášení uvedeno, že se jedná o větrnou elektrárnu. Toto jsem jednoduše vyřešil tak, že jsem zařízení otypoval jako větrné čerpadlo na vodu, na něž česká legislativa ve svých zákonech zapomenula.

Celkově bych tedy chtěl vyjádřit své velké rozčarování a zklamání nad legislativním přístupem ČR nad výstavbou malých větrných nekomerčních elektráren. Chápu, že výstavba velké VE o gigantických rozměrech těmito schvalovacími procesy musí bez výhrad projít, ale proč musejí být těmito nařízeními zatíženy i malé větrné elektrárny, které jsou svojí velikostí pouhé „hračky“ a obvykle zcela autonomní?

Stávající zákon by tedy potřeboval kompletně novelizovat, aby jednotlivé VE byly rozměrově kategorizovány například jako je tomu v sousedním Německu a dále nastavit příslušným skupinám výkupní ceny elektřiny, tak aby u nás větrná energetika začala být opět zajímavým odvětvím, stejně jako v letech 1990 - 1995. Řešením této situace bych viděl v převzetí kompletní legislativy z Německa a její úpravě na místní podmínky ČR.

2 VÝPOČTOVÁ ČÁST

2.1 Parametry stavby VE

Pro výpočet nejdůležitějších fyzikálních údajů mojí konstrukce VE uvádím její základní parametry.

Celková výška = 10 m

Výška stožáru = 5 m (stožár je umístěn ve svém stojanu ve výšce 5 m nad zemí)

Průměr rotoru = 2,65 m

Počet listů rotoru = 4

Šířka lopatky rotoru = 19 cm

Délka lopatky rotoru = 1m

Celková délka jednoho rotorového křídla = 1,3 m

Hmotnost gondoly bez rotoru = 20 kg

Hmotnost rotoru = 13 kg

Hmotnost stožáru = 40 kg

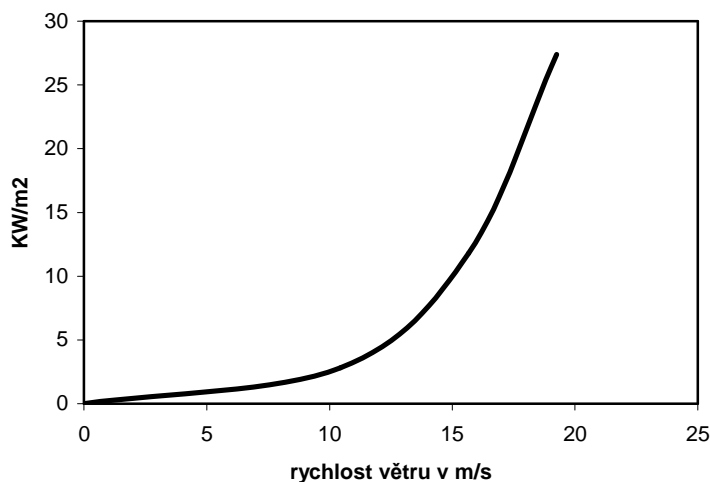
2.2 Výkon větru

Již dříve bylo zjištěno [2], že výkon větru stoupá s třetí mocninou jeho rychlosti. Zaleží na velikosti plochy, která je tlaku větru vystavena a hustotě daného prostředí. Z tohoto byl odvozen následující vztah:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 \quad (1)$$

Kde: P...výkon větru [W]
S...celková čelní plocha rotoru nastavená přímo proti větru [m²]
v...aktuální rychlost větru [m/s]
ρ...hustota vzduchu = 1,293 kg/m³

Výkon větru vztahovaný na určitou plochu



Obr. 2-3: Graf výkonu větru vztahovaný na plochu 1m²

2.2.1 Příklad výpočtu výkonu větru působícího na vlastní konstrukci VE

Pro všechny výpočty platí, že celková plocha rotoru je dána vztahem:

$$S = \frac{\pi D_{celk.}^2}{4}, \text{ kde } D_{celk.} = 2,65 \text{ m} \quad (2)$$

Zjištěná celková čelní plocha je tedy $S = 5,52 \text{ m}^2$

a) *Pro rychlost větru $v = 3 \text{ m/s}$.* Tato rychlost větru je potřebná pro rozběh elektrárny s nenabuzeným generátorem, v tomto režimu elektrárna slouží pouze jako větrné kolo.

Dosazení do vztahu (1)

$$P = \frac{1}{2} * 1,293 * 5,52 * 3^3$$

$$P = 96,35 \text{ W}$$

Budit generátor v tomto stavu nemá smysl, protože výkon větru je nedostačující.

b) *Pro rychlost větru $v = 4,5 \text{ m/s}$.* Tato rychlost větru je potřebná pro rozběh elektrárny s nabuzeným generátorem. Po dosazení do (1).

$$P = 325,19 \text{ W}$$

c) *Pro rychlost větru $v = 10 \text{ m/s}$.* Tuto sílu větru a jí blízké považuji za nejefektivnější pro mojí větrnou elektrárnu. Po dosazení do (1).

$$P = 3,569 \text{ KW}$$

d) *Pro rychlost větru $v = 30 \text{ m/s}$.* Tato síla působí na elektrárnu při vichřicích a orkánech a všechny větrné elektrárny by tuto hodnotu rychlosti větru měli vydržet.

$$P = 96,354 \text{ KW}$$

Při nedávných vichřicích (leden 2007) jsem si mohl odzkoušet zda i má stavba splňuje toto kritérium. Elektrárna obstojně vydržela všechnu tuto extrémní zátěž i několikanásobný výpadek proudu, při kterém nemohla být bržděna buzením generátoru.

2.3 Koeficient rychloběžnosti rotoru

Dle koeficientu rychloběžnosti (SR) se větrná zařízení dělí na *pomaluběžná* - větrné růžice, westernová čerpadla na vodu (SR ~ 1,5). A *rychloběžná* (SR ~ 12) např. jednodílné rotory. Vlastní koeficient rychloběžnosti (SR) je pak definován jako poměr rychlosti na hrotu listu lopatky ku rychlosti volného větru.

$$SR = \frac{U_{MAX}}{v_1} \quad (3)$$

Moderní rotory mají většinou tuto hodnotu v rozmezí 4 až 9. Důležitým parametrem závislým na tomto koeficientu je rozběhové chování. Na toto chování má především vliv velikost momentu působícího na stojící lopatku, proto se snažíme aby daná lopatka byla konstrukčně co možná nejdelší. Vedle délky ramen lopatek má na rozběh také velký vliv plošné pokrytí rotoru a druh použitého generátoru.

Plošné pokrytí udává procentuální hodnotu, kterou v čelní ploše rotoru zabírají jeho lopatky. Přímou souvisí s koeficientem rychloběžnosti a to tak, že čím je vyšší plošné pokrytí, tím je menší koeficient rychloběžnosti. Z praxe by u malých zařízení VE mělo být

plošné pokrytí alespoň 15%. Tato hodnota zaručuje rozběh elektrárny při rychlosti větru kolem 4 m/s. U vysokých hodnot plošných pokrytí vznikají problémy při vichřicích. Rotor a celé větrné zařízení je totiž velmi namáháno odporovými silami větru. Volba tohoto koeficientu by měla být jedním z prvních kroků konstruktéra. V mém případě jsem se pohyboval spíše experimentální cestou, protože jsem vlastní rotor nejprve navrhl dle několika základních kritérií - především čelní plochy a finančních možností na použitý materiál. Po jeho konstrukci teprve spočítal vlastní koeficient rychloběžnosti.

2.3.1 Stanovení koeficientu rychloběžnosti vlastní konstrukce rotoru VE

Nejprve spočítám plošné pokrytí rotoru ($S_{rot} [m^2]$) a to dle vzorce:

$$S_{rot} = k * (a * b) \quad (4)$$

Kde: a,b...délka a šířka jedné lopatky v m

k...počet lopatek rotoru

koeficient 4 udává počet lopatek mého rotoru, po dosazení:

$$S_{rot} = 4 * (0,19 * 1) = 0,76 m^2$$

Dále vím, že celkový plošný obsah je dle vztahu (2) $S_{cel} = 5,52 m^2$.

$$S_{rot} [\%] = \frac{0,76}{5,52} * 100 = 13,76\%$$

Výsledná plocha rotoru je tedy téměř 14%. K rozběhu elektrárny je zapotřebí vítr o síle 4 - 5 m/s. Tato hodnota odpovídá vypočtené ploše rotoru.

K vypočtení hodnoty koeficientu rychloběžnosti bohužel nemám odpovídající technické prostředky. Především nemohu změřit rychlost větru na konci (hrotu) lopatky. Proto ho pouze orientačně stanovím ze známých výsledků pro jednotlivá řešení větrných zařízení, která jsou publikována v odborné literatuře [2] s přihlédnutím na konstrukční nedostatky oproti ideálnímu tvaru lopatky. Po této úvaze stanovuji koeficient rychloběžnosti mé konstrukce rotoru na hodnotu $SR = 4$. Tato hodnota by se mohla zdát pro čtyřlopatkový rotor vysoká. Beru zde ale především v úvahu větší hmotnost rotoru a jeho jednotlivé lopatky, které se svým tvarem pouze přibližují ideálnímu tvaru.

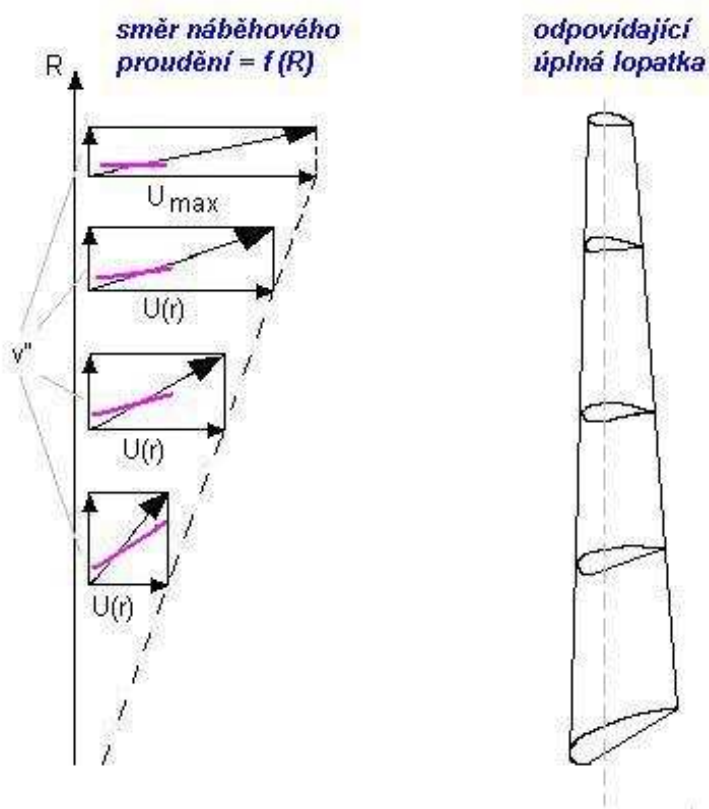
2.4 Ideální tvar lopatky rotoru

Při výrobě rotoru jsem se snažil při daných technických možnostech přiblížit ideálnímu tvaru lopatky rotoru, kterou popisuje Betzova teorie viz. [2]. Albert Betz popsal přesně lopatku pomocí čtených výpočtů a dle nich jí také navrhl. Hlavními rozměry lopatky jsou její délka, která odpovídá výslednému průměru rotoru a dále hloubka a tvar jejího profilu. Parametry pro určování kvality rotoru jsou rychlost větru „daleko“ před rotorem a rychlost větru za rotorem. Tento poměr rychlostí větrů by měl být ideálně 3:1. Tak by měl být zaručen odběr optimálního výkonu. Obvodová rychlost na hrotu (konci) lopatky bývá označována U_{max} . Pro každý jiný bod na lopatce U_r . S těmito hodnotami souvisí i popisovaný koeficient rychloběžnosti. Tvar ideální lopatky tedy závisí na poměrech proudění. Ty vyplývají z projektované rychlosti a koeficientu rychloběžnosti stanovené stavitelem. Na obr. 2-4 jsou zobrazeny hloubky profilů a úhly náběhů vzhledem k náběhovému proudění. Z těchto předpokladů vychází pak konečná konstrukce lopatky - na obrázku napravo. Takto se navrhuje ideální lopatka větrného zařízení z předem zjištěných, nebo navrhnutých údajů. Údaj v zde představuje rychlost proudění vzduchu ve středu kola popsanou Albertem Betzem, měla by mít zde konstantní hodnotu. S rostoucí

délkou lopatky tato rychlost velmi nepatrně klesá (můžeme ji ve výpočtech považovat za konstantní). Pro její výpočet tedy platí:

$$v'' = \frac{1}{2} \left(v_1 + \frac{1}{3} * v_1 \right) = \frac{2}{3} * v_1 \quad (5)$$

Kde v_1 ...rychlost větru.

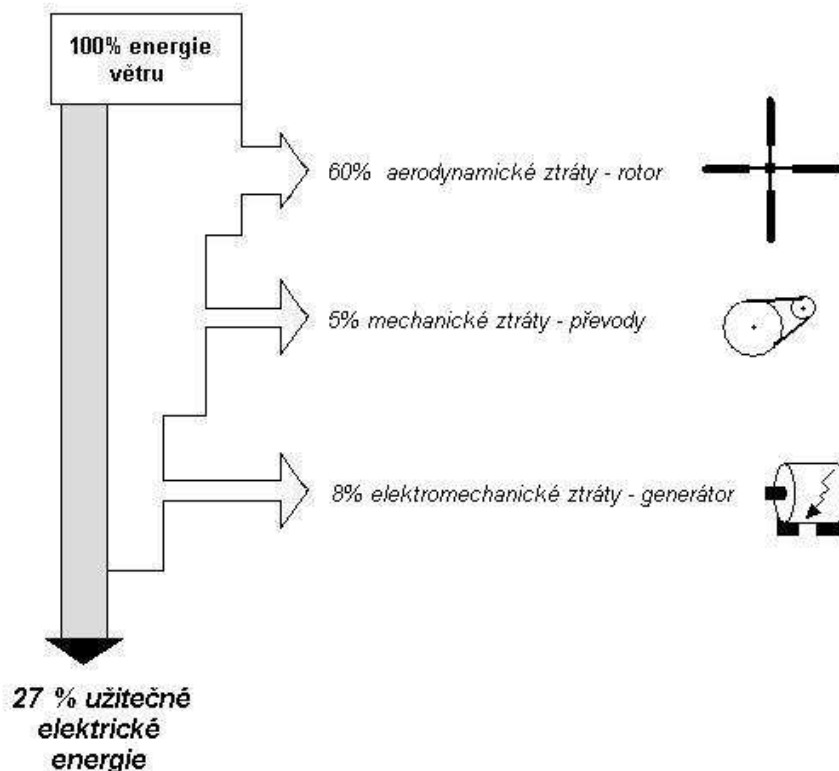


Obr. 2-4: Konstrukce lopatky dle funkce náběhového proudění

2.5 Účinnost větrného zařízení

O užitečnosti větrných zařízení se nedá pochybovat, již zpočátku byla větrná zařízení neodmyslitelnými lidskými pomocníky. Prvotní zařízení pracovala s malou účinností, ale i ta stačila k odvedení své práce (větrné mlýny, vodní čerpadla). S evolucí těchto zařízení a rozvojem jednotlivých technologií rostl postupně i důraz na zvyšování účinnosti. I dnes se stále objevují nové zprávy o zavedení nových inovací a tím pádem i zvýšení účinností větrných zařízení. Tyto inovace mají další vliv především na ekologii a politiku.

Celkovou účinnost zařízení si můžeme představit ze schéma na obr. 2-5. U jednotlivých součástí VE je vyjádřeno procento ztrát z celkového výkonu. Tento obrázek odpovídá dnešním běžným svépomocně vyrobeným konstrukcím VE.



Obr. 2-5: Účinnost větrného zařízení

Dle tohoto schéma pak můžeme následně určit celkovou účinnost zařízení:

$$\eta_{CELK} = C_p * \eta_m * \eta_g \quad (6)$$

Kde:

- η_{CELK} ... celková účinnost zařízení [%]
- C_p ... účinnost rotoru
- η_m ... účinnost převodu a třecí ztráty
- η_g ... účinnost generátoru

2.5.1 Výpočet celkové účinnosti vlastní konstrukce VE

Moje vlastní konstrukce větrné elektrárny nedosahuje takové míry účinnosti jako bylo naznačeno v předchozím textu. Je to způsobeno tím, že jsem z finančních možností omezil stavbu elektrárny na minimum. I tak ale stavba dle mého názoru dosahuje velmi dobrých výsledků. Bohužel nemám možnost technicky změřit ztráty vznikající na jednotlivých součástech. Proto hodnoty ztrát na jednotlivých součástech volím pouze přibližné. Ztráty v převodech jsou vysoké z důvodu použití dvojitého převodu. Výslednou hodnotu účinnosti 22% беру pouze jako přibližnou hodnotu.

$$C_p = 45\%$$

$$\eta_m = 80\%$$

$$\eta_g = 60\%$$

po dosazení: $\eta_{CELK} = 0,45 * 0,8 * 0,6$

$$\eta_{CELK} = 22 \%$$

3. STAVBA MALÉ VE

S nápadem postavit si vlastní malou větrnou elektrárnou jsem přišel přibližně v květnu v roce 2006. Nejprve jsem prostudoval všechnu dostupnou odbornou literaturu a poté dobře zvážil všechny možné problémy a komplikace, které při této vlastní stavbě mohou nastat. Jelikož mám doma k dispozici potřebné vybavení a materiál, pustil jsem se koncem června 2006 do stavby malé větrné elektrárny. V této době jsem také začal uvažovat nad tím, že o této stavbě napíši bakalářskou práci. Větrná elektrárna byla dostavěna a vztyčena koncem října stejného roku. Dále na ní samozřejmě probíhaly a probíhají různé modifikace a ladění. Je to způsobeno především tím, že se jedná o prototypový výrobek. Elektrárna je postavena na základě vlastního konstrukčního návrhu.

V další části mé práce najdete konstrukční a technologický návod, s jakým jsem postupoval při výrobě vlastní malé elektrárny. Představím zde možné konstrukce jednotlivých částí a vysvětlím, proč jsem si vybral právě dané řešení.

3.1 Stojan stožáru

Než jsem započal všechny práce spojené s konstrukcí VE a její základny – stojanu pro budoucí VE, musel jsem pečlivě zvážít jaký typ vlastního stojanu a jeho spojení se stožárem zkonstruuji. Jelikož se mi po přečtení [2] velice zamlouvala sklopná konstrukce stožáru v jeho stojanu, která sebou přináší snadnost přístupu k samotnému zařízení VE a k nutným servisním úkonům, rozhodl jsem se tedy pro tuto variantu.

První práce směřovaly k výběru správného stožáru a následnému zkonstruování vlastního stojanu, do kterého přijde později hotový stožár upnout. Mírnou komplikací pro mne byl fakt, že tento stojan nebude ukotven – zabetonován v zemi, ale bude vevařen do konstrukce soustavy vodních nádrží na užitkovou vodu, která se nachází na zahradě našeho pozemku.

Toto řešení představuje jednu podstatnou výhodu a to tu, že stojan bude umístěn ve výšce 5 m nad terénem a tím společně s dalším 5 m dlouhým stožárem zajistím dostatečnou pracovní výšku rotoru VE nad ostatními stromy a překážkami. Předem bylo u tohoto řešení jasné, že bude potřeba při této výšce stožáru zajistit také jeho dostatečné ukotvení. Vyřešit také to, aby bylo možné stožár v budoucnu sklápět až pod úroveň vlastního stojanu, v ideálním případě tak, aby se konec sklopeného stožáru nacházel v rozmezí výšky 1-2 m nad zemí.

Ještě před započítím prací na vlastním stojanu jsem nakreslil na papír dva výkresy možných konstrukčních řešení. První řešení obnášelo vaření jednotlivých T-profilů pod úhlem 90 stupňů a působilo velmi neestetickým dojmem, navíc by po možném zkonstruování mohly nastat jisté problémy se stabilitou zařízení. Druhé řešení zajišťovalo spojení konstrukce nádrží a vlastního stojanu za pomoci šikmých L-profilů a působilo velmi dobrým dojmem, jak z hlediska estetiky, tak pevnosti.

Nevýhodou tohoto typu řešení byla nutnost šikmého řezání L-profilů a celkově komplikovanější výrobní postup takového stojanu. Po nalezení vhodného stožáru jsem tedy začal konstruovat vnitřní tělo stožáru, do kterého se později bude stožár upínat a sklápět se v něm. Jako základní materiál jsem zvolil jeklový profil se svými rozměry 65x65 mm a silou stěny 1 mm. Budoucí vrcholy stojanu jsem seřízl v šikmém směru a vzniklé otvory zaslepil patřičnými plechovými víčky. Jako nosný díl obou těchto čtvercových profilů jsem zvolil silnostěnný U profil o rozměrech 920x130x50 mm. Tento profil zajišťuje celému stojanu dokonalou pevnost a zároveň zajišťuje styk stojanu s horní nádrží, na které je tento profil osazen. Mezi oba jeklové profily jsem vsadil dřevěný hranolek o šířce 90 mm, tento rozměr je stejný jako průměr spodního dílu stožáru, a pečlivě jsem tyto profily rozměřil

na vodorovný základní U profil. Po přesném spasování a zaúhlování jsem tento budoucí základní díl stáhnul pevně truhlářskými svěrkami a nabodoval ho obloukovou svářečkou jako přípravu pro svaření MIG svářečkou, kterou byl později základní díl stožáru zbytek konstrukce VE kvalitně svařen. Když byl tento základní díl stojanu dokonale svařen, vsadil jsem do něho základní – spodní díl stožáru a za pomoci horizontální vrtačky tyto díly svrtal průměrem 20 mm v jedné ose dohromady. Tím jsem zajistil pozdější snadnou montáž a demontáž čepů, které drží stožár ve stojanu. Následně jsem u stojanu ještě k zesílení okolo těchto vyvrtaných otvorů navařil z vnějších stran výztuhy v podobě 3 mm širokých velkoplošných podložek pro průměr 20 mm.

Následné práce se prováděly na konstrukci nádrže, kde bylo zapotřebí prodloužit jednotlivé svislé nohy konstrukce pro přivaření šikmých podpěr základního stojanu. Prodlouženy musely být též z důvodu velikosti průměru horní nádrže i každý ze čtyř svislých hlavních nosníků nádrží a to stejným materiálem jako jednotlivé šikmé vzpěry. Zde se vyskytl menší problém při svaření těchto nestejně silných materiálů různých vlastností, vyřešili ho ale dlouholeté svářečské zkušenosti mého otce. Po rozměření a navaření těchto 4 prodlužovacích profilů tvaru L o délce 500 mm, jsem na nádrž umístil základní – vnitřní díl stojanu, který jsem vyrovnal za pomoci olovnice a vodováhy do roviny.

Následovalo rozměření šikmých podpěr a jejich nařezání. Toto byla velice obtížná práce, protože bylo nutné vyřezat pečlivě všechny úhly s velkou pečlivostí a samotné úhly spojení vzpěr a stojanu jsem neměl jak technicky změřit. Délka jedné vzpěry vyšla 1240 mm a jako materiál jsem zvolil L-profil o rozměrech 65x65 mm a základní šířce 4 mm. Následně byly tyto podpěry přibodovány k hlavnímu stojanu přímo na konstrukci nádrže a takto vzniklý „pavouk“ bylo nutné z nádrže sundat na zem pro finální svaření. Mezitím jsem si z betonářské oceli svařil na zemi obdélníkový přípravek, který měl za úkol zajistit neměnnost rozměru podpěr v místě, kde přijdou přivařit do konstrukce nádrže. Při svařování totiž dochází vlivem teplotního pnutí k mírnému smrštění materiálu, to u malých a krátkých výrobků není tak markantní jako u dlouhých konstrukcí, jako byly mé stojanové podpěry. Následně jsem tento svařený díl umístil na své budoucí místo a s konstrukcí nádrže ho nejprve zkušebně spojil pomocí svěrek.

Před přivařením celého stojanu do konstrukce nádrží je totiž velice vhodné zajistit kolmost stožáru ve všech směrech, tak aby později nestál stožár našikmo. Vložil jsem tedy hlavní díl stožáru do stojanu a sčepoval jsem ho již zhotovenými silnostěnnými čepy, které jsou jištěny závlačkami. Jelikož jsem měl k dispozici pouze krátkou zednickou vodováhu, která u větších délek již postrádá svojí přesnost, omezil jsem toto vyrovnání pouze na olovnici a svůj zrak. Práce na konečném vyrovnání a svaření byly velmi zdoluhavé, neboť vlivem pnutí materiálu při vaření jednotlivých podpěr jsem musel znovu celý stojan pracně vyrovnávat. Ovšem trpělivost při této práci se mi oplatila konečnou perfektní svislostí stožáru v celé jeho délce.

Konečnou prováděnou prací byly povrchové úpravy hotového stojanu, které obnášely dokonale odřezání a několik nátěrů speciální barvou na konstrukce.

3.2 Stožár

Při výběru, jaký stožár pro svou VE zkonstruuji, jsem se dlouho nerozmýšlel. Je sice pravdou, že nejsnazší cestou ke stožáru je zkusit sehnat příhradový stožár pro dráty elektrického vedení, občas je vidět takový stožár v kovošrotech a sběrnách, ale pro moji konstrukci a při daných podmínkách umístění se mi jako nejvýhodnější jevil stožár trubový. A ten jsem také použil.

Podle typu základní truby bylo totiž nutné nejprve vyrobit stojan pro stožár VE a ten dále zabudovat do konstrukce rámu nádrže, takže volba stožáru a jeho materiálu se

stala jednou z mých prvních prací na stavbě mé malé VE. Dlouho jsem se rozhodoval, jaký typ materiálu použiji a také jsem neměl jasnou představu o celkové délce stožáru. Nabízela se mi relativně slabostěnná truba o průměru 70 mm a délce 5 m, ale nebyla pozinkována a koroze na ní vykonala už značný díl své práce. Proto jsem se rozhodl, že ji jako polotovar pro stožár nepoužiji. Při hledání vhodného polotovaru na výrobu stožáru jsem narazil na zinkovanou trubu o průměru 90 mm a délce 3 m, truba byla ve velice dobrém stavu bez známek koroze, její vnitřní průměr byl 80 mm a jevila se mi jako ideální pro můj budoucí stožár. Zpočátku jsem byl nemile překvapen její hmotností, ale její rozměry a stav slibovaly tuhost, která je nutná pro základní část, která byla při hotovém stožáru nakonec sčepována s konstrukcí sklápěcího stojanu.

Tuto trubu jsem tedy použil jako základní díl budoucího stožáru. Po jejím svrtání se základní konstrukcí stojanu jsem jí zkusmo připevnil do stojanu a za bezvětrí postavil ve smontovaném stavu na nádrž. Na první pohled se mohlo zdát, že celková výška bude dostačující, ale poté se mi nelíbilo jisté stínění budovou stodoly a vzrostlého stromu ze severozápadní strany stavby a rozhodl jsem se, že navýším stožár ještě o kus, abych měl opravdu zaručeno, že pracovní oblast rotoru VE bude ve výšce, kde jí už tolik nebudou omezovat vzrostlé sadové stromy. Obstaral jsem proto další trubu o průměru 72 mm a délce 2,7 m, která se měla stát druhým dílem stožáru. Rozhodl jsem, že přesah tohoto spojení bude 700 mm, tak aby celková délka stožáru dala 5 m.

Musel jsem řešit ale jeden problém a to sice, že tyto průměry do sebe pasují, ale trubky v sobě mají na poloměru vůli 4 mm. Řešením tohoto problému by se mohlo zdát vysoustružení dvou vymežovacích pruhů mezi tyto jednotlivé průměry, ale neměl jsem doma odpovídající materiál na tento úkon, proto jsem tento problém vyřešil navařením pásovin na menší trubu ve vzdálenosti 600 mm od sebe. S nabodováním 50 mm široké pásovin nebyl problém, ten se ukázal až při prvním pokusu složit obě trubky do sebe. Pásovina na menší trubě totiž nebyla navařená stejnoměrně a tak někde odstávala od trubky o několik desetin milimetru více či méně. Zpočátku jsem tento problém snažil vyřešit sklepaním pásu kladivem, ale jelikož byl již dobře přivařen, tak mi to moc nešlo. Napadlo mě tedy jediné možné řešení a to bylo mírné zbroušení těchto vymežovacích pásů. Vždy jsem obrousil první pás jen mírně a zkoušel ho do velké trubky, aby spojení těchto dvou částí bylo co nejtěsnější z důvodu rovnoběžnosti obou částí stožáru. Stožár jsem si před složením obou dílů v základní části naměřil a provrtal jako přípravu pro vevaření druhé části. Poté, co jsem měl menší – druhou část stožáru připravenou pro složení, jsem ji nasadil do základní části a mohutnými ranami kladivem na její druhý konec ji postupně zavedl do základní části. Spojení obou částí bylo nakonec velmi těsné, takže v sobě oba dva díly byly velmi dobře spojeny a prakticky lidskou silou neoddělitelné.

Po tomto složení se přesunul budoucí stožár na svaření, měl jsem z této procedury zpočátku trochu obavy, protože mezi svářeči je všeobecně známá věc, že pozinkovaný materiál se velmi těžko sváří a je nutné nejprve zinek z kovu mechanicky odstranit – odbrousit, což je velmi zdoluhavá procedura. Byl jsem mile překvapen zjištěním, že tento materiál jde docela zdařile svářet i s přítomností pozinkovaného povrchu, jediným negativem byla nutnost častějšího vyčištění hubice svářecí pistole, ta se totiž ucpávala a bránila přívodu plynu ochranné atmosféry. Do hotového sváru obou trub jsem ještě dále vevařil 3 oka pro budoucí kotvící lana.

Dále mé práce na stožáru pokračovaly navrhnutím pomocného zvedacího mechanismu, který jsem sice jako nápad viděl na jiných malých stavbách VE, ale pro své účely jsem ho mírně modifikoval a to tak, že stožár se zvedací pákou nesvírají pravý úhel, nýbrž úhel o něco větší, řádově 110 stupňů. Tato modifikace je zde z toho důvodu, že stojan stožáru je umístěn ve výšce 4,5 metrů nad zemí a zařízení bylo navrženo tak, aby šlo sklopit až pod úroveň tohoto stojanu z důvodu snadného přístupu při údržbě

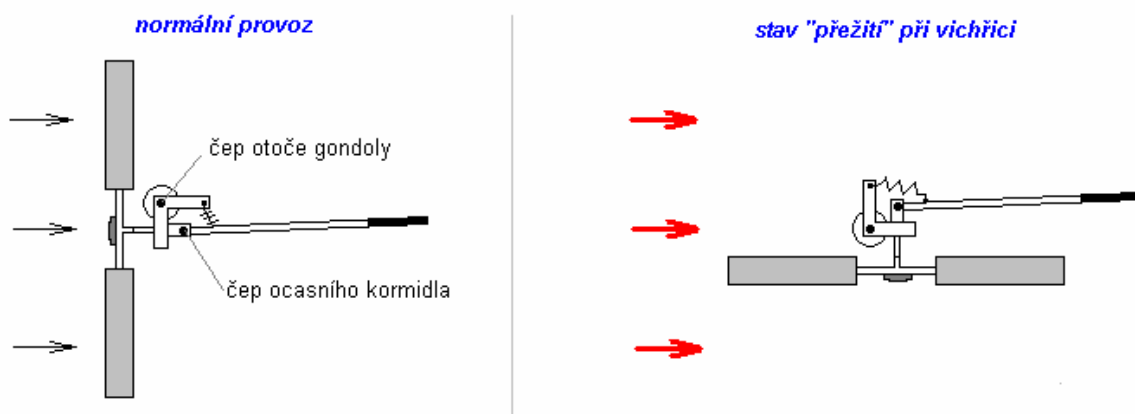
a opravách či modifikacích VE. Díky tomuto tupému úhlu je pak stožár ze své sklopené polohy daleko lépe zdvižitelný a ve vztyčené poloze jde rameno tohoto zařízení směrem mírně šikmým k zemi kolem profilu nádrže. Toto pomocné rameno tvoří zinkovaná trubka o průměru 40 mm a délce 2,32 m a je přivařena v dolní části stožáru. Na této trubce je dále ještě přivařena vzpěra, kterou jsem zde přivařil z důvodu obavy o to, zda toto namáhání svár pomocného ramene a stožáru vydrží. Na konec pomocného ramene už zbylo jenom přivařit oko vytvořené z betonářské ocele o průměru 10 mm. Tím byly všechny potřebné svářečské práce hotovy. Stožár bylo nutné ještě na vrchní straně zarovnat odříznutím, protože byl konec nepravidelný od úderů kladivem při spasovávání. Po výrobě otočného čepu VE byl ještě stožár ve svém vrcholu provrtán třemi děrami o průměru 10 mm s úhlovou roztečí 120 stupňů, ty slouží k montáži zařízení gondoly a její přichycení šrouby M8 ke stožáru. Stožár byl dále opatřen speciální základovou a vrchní barvou na konstrukce a jako vrchní nátěr jsem zvolil bílou barvu.

Myslím, že konstrukce stožáru je velmi zdařilá, ať už tím, že má svůj vlastní vztyčovací systém a je použito kvalitních a pevných materiálů tak, že se jedná o materiál zinkovaný. Ochranný nátěr pak zaručuje bezúdržbovost na dobu 3-5 let. Určitým negativem může být větší váha tohoto stožáru, kterou odhaduji na 40 kg. Bohužel jsem neměl vhodné technické vybavení, abych mohl vážení stožáru provést.

3.3 Gondola

3.3.1 Asymetrická regulace proti nadměrným účinkům větru

Před návrhem rámu gondoly jsem si přečetl [1]. Zde mne zaujala konstrukce rámu gondoly s asymetrickým uložením rotoru, které ve spojení s ocasem umístěným v čepu vytvářelo regulaci proti nadměrným účinkům větru. Rozhodl jsem se, že toto zařízení použiji vhodně přizpůsobené i na mou vlastní budoucí gondolu. Tato regulace se mi zdála být ze všech nabízených variant v [2] nejrozumnější a nejefektivnější. Funkce této regulace je popsána na následujícím obrázku 3-1.



Obr. 3-1 Funkce regulace proti nadměrným účinkům větru

Tato regulace nefunguje ovšem jenom v těchto základních dvou polohách, jak je naznačeno na obr. 3-1. Umožňuje též plynulé vytáčení rotoru ze směru větru v závislosti na intenzitě síly větru. Hlavní součástí této regulace je pružina, která je umístěna mezi rám gondoly a ocas. Její přepětí vrací a přitahuje ocas nazpět do své výchozí polohy.

Princip regulace: Na rotor začne působit velká čelní síla větru, ten se díky svému asymetrickému umístění proti čepu stožáru začne stáčet ve směru působící síly, tomu však vhodně brání ocasní kormidlo, které se snaží vyrovnávat rotor do kolmého směru

proti větru. Velikost a sílu tohoto vyrovnání určuje tažná síla pružiny, která musí být vhodně dimenzována v celém svém rozsahu, tak aby vždy při zmenšení intenzity síly větru navracela ocasní kormidlo do své výchozí pozice. Ve výchozí pozici je kormidlo předsazeno asi o 10 stupňů a tím je dosaženo vyrovnání rotoru při normální síle větru.

Nejsložitějším nastavovaným parametrem tohoto regulátoru je odhad síly a velikost potřebné pružiny. Sám jsem tuto pružinu několikrát vyměňoval a posouváním v obou součástech upravoval její přepětí. Musíme také dát pozor na to aby nedošlo k „vytažení“ pružiny v její krajní poloze při vichřicích, ta se pak unaví a nevrátí již kormidlo do své výchozí pozice. Konečné vlastnosti této regulace a její funkčnost si může čtenatel této práce prohlédnout na videích přiložených na CD u této bakalářské práce.

3.3.2 Náboj rotoru

Rotorový náboj se svým hřídelem vznikl patřičným upravením dílu zadní poloosy z vozidla škoda 120 viz obr. A1-3. Celá součást byla před instalací do rámu gondoly repasována. Výhodou této konstrukce je doživotní spolehlivost ložisek tohoto dílu, která jsou konstruována na několikanásobné zatížení a přenos kroucího momentu, než tomu tak je u mé VE. Rovněž tento díl pečlivě chrání ložiska proti vniknutí vody nainstalovanými simerinky a zatmelením všech vík ložisek. Na hřídel rotoru je pak dále pomocí kuželu a klínu přidělán brzdový buben. Ten byl ovšem upraven soustružením. Nyní tvoří jenom malou přírubu se čtyřmi šrouby M14, na kterou je středěn a přišroubován vlastní rotor VE. Vlastní hřídel rotoru vznikl taktéž upravením a zkrácením hřídele poloosy. Zde jsem se potýkal s problémem vzniklým zakalením hřídele při jeho výrobě, a tak byl jen velmi těžce opracovatelný. Na konec tohoto hřídele bylo přesně rozměřeno a zhotoveno osazení pro velkou řemenici budoucího převodu. Tento hotový celek je zobrazen bez příruby rotoru na obr. 3-2. Po přestavbě gondoly viz. kapitola 4, slouží toto samé osazení pro montáž ozubeného kola.



Obr. 3-2 Hotový náboj rotoru s nainstalovanou řemenicí převodu.

3.3.3 Rám gondoly

Rám gondoly vychází ze základního svařence úhelníků do tvaru L, ke kterému je přivařen střed otoče stožáru a vhodně vyztužen. Na tento svařenec jsem dále zkonstruoval držák ocasního kormidla. Samostatný držák je opatřen ramenem, které má funkci držet tažnou pružinu a přitahovat tak ocas VE do své výchozí polohy. V tomto držáku jsem vyvrtal několik děr, stejně tak jako v ocase. Tím jsem zařídil široké spektrum nastavení

tahu pružiny. Na konstrukci držáku ocasu jsem dále pečlivě rozměřil držáky alternátoru a ty zde přibodoval. Této práci jsem věnoval velkou pečlivost, protože dokonalé středění zabrání vzniku nadměrných ztrát z důvodu vysokého tření klínového řemene. Teprve po zkoušce souososti řemene jsem tyto díly přivařil napevno. V konečné fázi byly na rám dovařeny držáky kabelů a dlouhé šrouby M6, které měly za úkol držet stříšku VE.

Následovala povrchová úprava celého dílu speciálním nátěrem na konstrukce. Tento hotový celek si můžeme prohlédnout na obr. A1-6. Rám byl zkušebně osazen alternátory a klínovým řemenem, který jsem si nechal vyrobit speciálně na zakázku. Tento řemen měl rozměry 9 x 1675 mm.

Zpočátku jsem byl nemile překvapen silou potřebnou k roztočení celého zařízení. Ta byla větší z důvodu čerstvě naplněných ložisek rotoru i generátorů mazacím tukem. Takto osazená gondola již byla připravena pro budoucí montáž na čep stožáru.

Po přestavbách gondoly viz. kapitola 4 se vzhled rámu gondoly nepatrně změnil, obr. A1-7. Tyto změny byly nutné k instalaci dalšího převodu ozubenými koly a pomocného náboje, který zajišťoval převod klínovým řemenem k jednomu alternátoru. Druhý byl natrvalo odstraněn. Ke změnám došlo pouze na rámu gondoly. Ten musel být ze své zadní strany zkrácen pro použití velkého ozubeného kola. Tím pádem se také změnil tvar jedné výztuhy držáku ocasu. Mezi tyto výztuhy, které jsou navařeny do základního rámu byl vložen náboj pomocného převodu a zde byl svrtán dvěma šrouby M8. Všechny tyto úpravy se neobešly opět bez pečlivého vyměření souososti dílů převodů. Nově byl též umístěn držák alternátoru. Rám gondoly po těchto úpravách působí menším a kompaktnějším dojmem.

3.4 Rotor

Rotor je nejdůležitější a obvykle také nejsložitější částí větrné elektrárny. Při stavbách rotoru se mezi sebou prolínají celé řady fyzikálních odvětví. Ať je to mechanika, pro návrh odpovídající pevnosti, aerodynamika, která studuje proudění kolem vlastních lopatek, či statika pro konečné vyvážení rotoru jako celku proti vzniku nežádoucích vibrací.

Při stavbě mého vlastního rotoru jsem vycházel z poznatků získaných v odborné literatuře a snažil jsem se co nejvíce přizpůsobit tvar rotoru a jeho lopatek ideálnímu modelu uvedenému na obr. 2-4, samozřejmě s přihlédnutím k mým technickým možnostem a v neposlední řadě k možnostem finančním. Předem mi bylo jasno, že rotor musí svojí základní dosedací částí pasovat dokonale na připravenou přírubu, která je spojena s hlavním rotorovým hřídelem zařízení.

Výhoda této konstrukce je v tom, že se dá rotor jako celek po odšroubování matic M14 oddělit od příruby zařízení. Pro svojí relativní jednoduchost jsem zvolil klasické uspořádání rotoru. Nepouštěl jsem se tedy do experimentování s jinými než svislými rotory. Svislé – „vrtulové“ hrají už několik let na poli větrné energetiky prim a zaznamenaly za tuto dobu velký konstrukční rozmach. Proto jsem i já zvolil tento typ rotoru, přesněji čtyř-lopatkový. Výhod má toto uspořádání hned několik. Především jde o snadnou konstrukci základní středové části rotoru, kdy jsou na sebe jednotlivé nátrubky pro budoucí lopatky kolmé a tím je značně ulehčena práce na tomto dílu. Rozměřování tohoto dílu například pro tří nebo šesti-lopatkové kolo je velice zdlouhavá práce. Čtyř-lopatkový rotor má velice dobrý poměr rychloběžnost / nominální otáčky. To znamená, že se tento rotor roztáčí bez zátěže již při nepatrné síle větru a při obvyklých větrných podmínkách dosahuje poměrně solidních otáček.

3.4.1 Konstrukce rotoru

Základní, páteřovou částí rotoru se stal jeho křížový střed, který vznikl přesným svařením jednotlivých nátrubků se základním kotoučem. Ocelový kotouč má přesně vysoustružený otvor o průměru 55 mm a tím je tento celek středěn na navazující přírubu náboje hlavního hřídele rotoru. Vnější průměr tohoto kotouče je potom 150 mm a jsou v něm vyvrtány 4 díry s vlastní středovou roztečí 130 mm. Ty zajišťují spojení s přírubou pomocí šroubů, které jsou naraženy v přírubě. Samostatné nátrubky jsou potom 150 mm dlouhé s šířkou své stěny 4 mm a jsou na nich navařeny matky M8 pro zajišťovací šrouby. Konstrukce těchto nátrubků zajišťuje možnost měnit při servisním zásahu natočení jednotlivých lopatek ve velkém rozpětí a také posun jednotlivých lopatek a tím konečně vyvážení rotoru, které je velice důležité pro snadný rozběh elektrárny již při relativně slabém větru a také z důvodů omezení kyvů a tím vzniklých vibrací. Do těchto nátrubků se zasunují trubky vlastní lopatky. Tyto trubky lopatky jsou 700 mm dlouhé a zasahují do půlky vlastní lopatky a tím ji též vyztužují. Původně jsem měl pro tyto trubky připravený slabostěnný materiál, ale po pozdějších úvahách jsem radši tento materiál nahradil silnostěnnou trubicí o průměru 12 mm, přeci jenom je tento díl vystaven silnému namáhání prakticky ve všech směrech, a tak by nebylo z hlediska bezpečnosti výhodné použít sice lehčích, ale méně materiálově odolných slabostěnných trubek. Lopatka je k této trubce přidělena třemi šrouby M6 a patřičnými velkoplošnými podložkami. Druhý díl trubky lopatky je vsazen do nátrubku křížového středu a je zde zajištěn dvěma šrouby M8, na vnitřním šroubu je navíc navléknutá pojistná matice, která slouží po dotažení tohoto šroubu k jeho zajištění proti povolení.

Poslední úpravou na středu rotoru bude do budoucna montáž kuželového středu rotoru. To proto, že čelní plocha náboje je velká, a tak se do ní silnější vítr opírá a tím působí svou odporovou silou na celou VE.

3.4.2 Lopatky rotoru

Dlouho jsem se rozmýšlel z jakého materiálu lopatky vyrobit. K výběru bylo hned několik možných řešení. Od hi-tech konstrukční řešení [2] v podobě ideálního laboratorně testovaného kapkového profilu CK 220, který téměř vylučuje vznik turbulentního proudění, po obyčejný hliníkový plech, který je ohnut ve své šířce na patřičný rádius a je dnes často používán v rozvojových zemích světa při konstrukcích zavlažovacích větrných čerpadel. Mojí hlavní snahou bylo přiblížit se co nejvíce ideálnímu tvaru lopatky obr. 2-4. Jelikož jsem dosud při konstrukci používal materiál, který jsem měl k dispozici, nechtěl jsem tedy stavbu vlastní VE jakkoliv prodražovat nákupem hotových lopatkových žeber či hliníkového plechu na zhotovení povrchu těchto lopatek. Určitou variantou pro mne byla i výroba vlastních dřevěných lopatek, podle příslušných šablon.

S velmi dobrým nápadem v tomto směru přišel můj otec. Vymyslel totiž, že by se tyto lopatky daly s určitými kompromisy vyrobit z plastových žlabů, které jsme měli bez užitku doma. A to tím, že se žlab přesně rozměří a našikmo se z něho vyříznou 2 lopatky. Nápad se to zdál velmi dobrý, a proto jsem začal předběžně na jeden žlab rýsovat předběžný tvar jedné lopatky. Při této práci již bylo nutné také počítat se směrem budoucího otáčení rotoru. Alternátory sice vyrábí elektrickou energii i po reverzaci jejich standardních otáček, ale jelikož byly oba použité alternátory již zaběhlé svým obvyklým směrem, nechtěl jsem na tomto směru otáček nic měnit z důvodů zaběhnutých ložisek a uhlíků, které zajišťují nabuzení rotoru.

Po prvním pokusném nárysu se mi zdál moc velký rozdíl v úhlech náběhu na jedné lopatce, proto jsem se rozhodl tento náběh zmenšit a celé lopatky znovu přerýsovat. Druhá varianta se zdála být v tomto ohledu vyhovující. Velkou pečlivost jsem si dal se zachováním jednotného rozměru u všech lopatek, tak abych neměl velké problémy

s budoucím vyvažování rotoru. Po důkladném narýsování tedy následovalo řezání těchto profilů na okružní pile. Plast při řezání vytvářel velmi malé a nepříjemné šupinky, které zůstávaly prakticky na všem. Po nařezání všech těchto lopatek jsem ještě ruční bruskou zaoblil jejich boční hrany z důvodu menšího odporu vzduchu a také lehce poupravil spodní a horní okraj lopatky.

Sice má tento profil ke své podobnosti s hi – tech profily daleko, ale i tak se dle mého názoru jedná o velmi dobré řešení. Profil lopatky se totiž do jisté míry podobá ideálnímu profilu. Ze závětrné strany je profil lopatky oblý, takže minimalizuje tvorbu nepříznivého turbulentního typu proudění větru. Z návětrné strany je profil dutý, což není zcela ideální, ale u mnoha levnějších montáží VE, zvláště v rozvojových zemích se tento profil používá dodnes.

Konečný rozměr lopatky je nyní 190x1000 mm při šířce 7 mm. Celková délka lopatky po namontování tyče, která zároveň slouží jako její výztuž, je 1300 mm a průměr rotoru tak činí přesně 2655 mm. Lopatky jsem při montáži na rotor natočil tak, aby jejich konce svíraly se svislou osou rotoru úhel 10 stupňů po směru větru. Později jsem vyzkoušel i několik jiných nastavení, ale toto základní nastavení se zdálo optimální, protože při něm rotor dosahoval velkých otáček a relativní potřebu slabého větru pro jeho počáteční rozběh.

3.5 Instalace VE na stanoviště

Instalaci zařízení VE jsem zahájil koncem měsíce října 2006. Ještě před samotnou instalací stožáru jsem jeklové profily stojanu zevnitř nakonzervoval olejem proti účinkům koroze. Poté jsem s pomocí mého bratra odnesl stožár na místo pod konstrukci nádrže a za pomoci lana ho vytáhl nahoru a začepoval horním (stálým) čepem. Zajistil jsem ho závlačkou patřičného rozměru. Byl jsem zvědavý, jak bude fungovat v praxi konstrukce navařená na stožáru, která má sloužit ke snadnému zvedání celého zařízení za pomoci lana.

Bylo mi jasné, že po instalaci zařízení gondoly již nebude tak snadné stožár za pomoci lidské síly vztyčit, ale i tak jsem byl mile překvapen potřebou relativně malé síly pro vztyčení samotného stožáru VE. Při této práci se ukázala výhoda nekolmého navaření vztyčovacího ramene stožáru, protože se stožár sklápí až pod vodorovnou rovinu svého ukotvení. V praxi to znamená, že stožár je uchycen ke svému stojanu ve výšce 4,5 metrů nad zemí a při sklopené poloze je jeho druhý konec, na který jsem se chystal přidělat zařízení gondoly, asi 1,5 metrů nad zemí. Takže k němu je relativně dobrý přístup přímo na zemi. To s sebou přináší jisté výhody při následném ladění, záběhu a odstraňování nedostatků zařízení VE. Není tedy nutné lézt na stožár nebo používat dlouhých žebříků, či plošin. Zařízení je tím pádem i snadno demontovatelné jako celek z místa svého momentálního umístění. Stožár jsem po zkušebním postavení zajistil dočasně i druhým čepem a vrhl jsem se do práce na lanovém ukotvení stožáru, protože vztyčovat již funkční zařízení přidělané na stožáru, který by byl po následném postavení neukotven, by bylo z hlediska bezpečnosti velice diskutabilní.

3.5.1 Ukotvení stožáru

Již při mých prvních představách o tom, jak bude vypadat konstrukce stožáru VE, mi bylo jasno, že pokud chci tuto stavbu umístit na konstrukci vodních nádrží, bude muset stožár obnášet nutná uchycení pro jeho bezpečné ukotvení. Toto uchycení jsem realizoval již při konstrukci vlastního stožáru, kdy jsem ho v jeho jednotlivých konstrukčních etapách jeho výroby zkoušel nasazovat do již hotové konstrukce stojanu. Při této práci jsem přemýšlel nad tím, kam umístím kotvící lana a kolik jich bude a jakým způsobem bude toto ukotvení provedeno.

V případě kotvení VE a podobných stožárových zařízení platí nepsané pravidlo, že kotvící lana by měla být od stožáru ve vzdálenosti nejméně rovné polovině celkové výšky stožáru. Pro moji konstrukci to znamenalo, že ukotvení musí být minimálně 5 m daleko od pomyslného středu stožáru na zemi. Jelikož bylo zařízení instalováno na zahradě našeho rodinného domu a v jejím těsném sousedství se nacházejí cesta a další stavby, které znemožňují přesné rozvržení lan ve stejné délce a úhlech, musel jsem vyjít z určitého kompromisu. Proto jsem se rozhodl již při konstrukci stožáru pro 3 kotvící lana s co nejbližší úhlovou roztečí k ideálním 120 stupňům. Na zemi jsem vytipoval 2 místa pro budoucí protějšky kotvících ok stožáru. S třetím místem byl problém, protože vycházel do obrysu budovy stodoly. Původně jsme s mým otcem zamýšleli toto lano uchytit k vaznici vazby střechy, ovšem po důkladném prozkoumání jsme zjistili, že v námi navrženém místě se zde vazba kříží s klestinami střechy, takže by se zde musel jeden z trámů provrtat a následně osadit šroubením s okem. Opásání tohoto spojení by bylo velice obtížně realizovatelné. Nabízelo se též využít zděného sloupku stodoly, ale ten je již poměrně nízko, takže by lano zasahovalo do vlastní konstrukce střechy a tedy jsem tento nápad rychle zavrhl. Otec tedy přišel s nápadem toto třetí lano mírně protáhnout a připevnit ho ke kmenu vzrostlého stromu - ořechu, který se nachází v těsné blízkosti objektu stodoly. Z počátku jsem v tomto nápadu nespatoval to pravé a konečné řešení, ale po prozkoumání mých dalších možností jsem došel k závěru, že toto řešení bude jedinou možností jak třetí lano ukotvit. Kmen stromu je již velice vzrostlý, stáří stromu asi 17 let, takže bylo jasné, že toto zatížení musí vydržet, navíc strom nejeví žádné známky hniloby dřeva nebo znehodnocení škůdci. Strom zároveň plní funkci dynamického členu a tlumí tak kmity vznikající při provozu VE.

Rozhodl jsem se proto opásat kmen ve výšce asi 2 metry nad zemí pásovinou dostatečného průměru, která se stahuje pomocí šroubení tak, aby neškrtla kmen stromu. Vyrobil jsem tedy obruč pro opásání s rozměry 860x80 mm. Spojení této obruče zajišťuje dostatečně dlouhé šroubení M10. Pod tuto pásovou obruč byla ještě přiložena gumová pryž z důvodu, aby nedocházelo k přímému kontaktu kov / dřevo. Na obruč bylo v místě jeho šroubení přivařeno oko pro ukotvení třetího lana.

Další otázkou bylo jak realizovat zbývajících dvě zemní ukotvení. Nabízelo se buď vykopat dostatečně velké otvory do země a ty zalít betonem s již připraveným patřičným ukotvením, nebo svařit speciální závrtné kotvy, které jsem viděl v publikaci [2]. Protože je celkově řešena VE jako přenosné zařízení, rozhodl jsem se pro druhou možnost a pustil jsem se do konstrukce závrtných kotev, se kterými jsem neměl do této doby žádné zkušenosti.

3.5.2 Zemní kotvy

Zemní kotvy jsem vyrobil z polotovaru silnostěnné trubky průměru 22 mm a vnitřním průměru 12 mm délky 920 mm. Na tuto kotvu byl postupně navařen hrot vysoustružený na soustruhu a z druhé strany zátka, tak aby do trubky nemohla vnikat vlhkost. Na konec s hrotem jsem navařil kruhový výpalek plechu o průměru 400 mm a tloušťce 5 mm, který jsem předem za pomoci páčidel a velkých kleští upravil ve svěráku do tvaru pravidelné šroubovice. Poté jsem vyrobil z kulatiny o průměru 15 mm oko, které bylo k přivaření na protější konec závrtné kotvy. Slouží jako kotvící oko pro lana a také jako místo kudy se dá protáhnout patřičná kulatina o odpovídající délce pro zavrtání kotev do země. Nejprve jsem z materiálu, který jsem na tyto kotvy použil, vyrobil pouze jednu. Trochu jsem se totiž obával výsledné funkčnosti této kotvy. Největší obavu jsem měl z pevnosti této kotvy, protože se tato kotva musí zavrtat téměř 800 mm do země a s mými předešlými zkušenostmi s vrtáky pro betonování sloupků plotů jsem věděl, že to nebude jednoduchý úkol.

Hotovou kotvu jsem tedy se svým otcem šel zkusit zavrtat do země a v případě, že by vše proběhlo v pořádku, by na svém místě zůstala už jako první kotvící místo. Pro zahloubení kotvy a její následné chycení do půdy jsem na daném místě odkopal trávu a zarazil kotvu do země. Okem jsem protáhl plnou ocelovou kulatinu o délce 1 m a začal kotvu zavrtávat do země. Již po prvním otočení mi bylo jasné, že tato páka je svojí délkou naprosto nevyhovující a že bude pro zavrtání potřeba daleko větší síly. Vyřešil jsem to tedy navléknutím dostatečně dlouhých vodovodních trubek na konce kulatiny prostrčené okem kotvy. I tak byla ale tato práce velice fyzicky namáhavá, navíc kotva do země moc rychle nepostupovala, řádově 4 – 6 cm na 1 otáčku. Při této práci jsem si postupně začal všimát postupného nakrucování a mírné deformace hlavní silnostěnné trubky. Asi v 2/3 zavrtání bylo toto nakroucení tak velké, že jsme se rozhodli kotvu vyšroubovat, protože hrozilo její přestřížení a pomyšlení, jak vykopávám kotvu z hloubky 500 mm pod zemí, se mi vůbec nezamlouvalo. Po vyšroubování jsem zjistil, že je hlavní trubka silně nakroucena a mírně zohnuta, proto jsem ihned začal přemýšlet nad tím, jak toto řešení kotvy zesílit tak, abych nemusel vyrábět kotvu jinou, protože jsem na to v té chvíli neměl ani potřebný materiál. Sice by se dalo využít materiálu připraveného na druhou kotvu, ale to jsem posoudil jako poslední možné řešení.

Prvním možným řešením vzniklého problému s tuhostí bylo vložit do vnitřního průměru kotvy kulatinu o průměru 12 mm. Odřízl jsem tedy oko kotvy a snažil jsem se nalézt vhodný kus kulatiny, bohužel jediné, co jsem v té době měl doma, byla betonářská ocel o průměru 12 mm. Ta je však známá svými vlastnosti velmi měkkého materiálu a též je velmi nepravidelně vyrobena, takže by bez nutných brusných úprav nešla ani do trubky kotvy nasadit. Tento způsob výztuže jsem tedy zavrhl. Po odříznutí oka mě ale napadl jiný nápad a to převléci přes stávající trubku ještě jednu o patřičných rozměrech a zajistit ji průvarovými sváry. Takto jsem tedy za pomoci topenářské trubky vyztužil celou kotvu a provařil ji skrz předvrtané otvory. Na konec kotvy bylo nutné navařit nové oko.

Při opětovné zkoušce kotva nevykazovala známky krutu či stříhu. Fyzicky nejobtížnější bylo zavrtat posledních 10 cm kotvy. Při následných zkouškách jsem se přesvědčil o tom, že kotva není ze země vyndatelná žádným jiným způsobem než opětovným vyšroubováním. Mírné obavy jsem měl z malého kyvu oka kotvy v zemi při větším bočním zatížení. Bylo způsobeno tím, že kotva nemá u povrchu země žádný boční opěrný systém, takže je zde relativně na volno. Tento menší nedostatek jsem vyřešil zakopáním a zatlučením pískovcového placatého kamene o velké šířce a ploše před kotvu ve směru očekávaného největšího namáhání na tah.

Tím jsem měl splněn předpoklad pro dobré zemní kotvení mého stožáru a následovaly práce spojené s instalací jednotlivých lan a napínáků.

3.5.3 Kotvící lana

V odborné literatuře o problematice VE [1, 2] se nacházejí lanové konstrukce zahrnující zemní a stožárové kotvení, napínací mechanismus, řetězy a silonová lana – ty jsou zde aplikované jako tlumiče možných kmitů, které můžou některá méně vyvážená řešení VE produkovat. Silonová lana jsem pro svoji konstrukci zavrhl z finančních důvodů, protože se nejedná o zrovna levné výrobky. Po uvažování jsem zvolil konstrukci lanového ukotvení tvořeného lany s patřičnými svorkami, napínáky a lanovými očnicemi. Ty zde splňují funkci bezpečnostní, protože lano s navléknutými očnicemi se dá využít dle patřičných směrnic norem na 60% své udávané maximální nosnosti, kdežto montáže bez očnic pouze do 40% udávané nosnosti lana.

Lano jsem zvolil vícepramenné o průměru 6 mm, protože pro mě bylo nejvíce materiálně přístupné. Abych mohl začít s přesným řezáním lan, musel jsem nejprve sehnat napínáky lan s odpovídajícími vlastnostmi.

Na výběr jsem měl ze dvou možností velikosti. Nakonec jsem zvolil větší variantu, protože má větší napínací rozsah (200 mm), a tak umožňuje velkou škálu nastavení svého přepětí. Nevím, na jakou maximální napínací sílu jsou tyto napínáky vyrobeny, protože jsem je sehnal ve stavu šrotu, ale subjektivně jsou svou velikostí předimenzované možností mého lana. Výhodou těchto napínáků je také to, že díky jejich velkému rozsahu není při sklápění stožáru nutné demontovat lanové svorky, jednoduše stačí napínák maximálně povolit a vyháknout z ok zemních kotev, nebo pásového ukotvení na kmeni stromu.

Po zajištění těchto vhodných napínáků lan jsem se věnoval samotné konstrukci jednotlivých lan. Při jejich konstrukci jsem tedy do všech ok vložil zpevňující očnice a na každé zakončení použil 3 lanové sponky. Všechny lanové svorky jsem pro jistotu opatřil ještě jednou jisticí maticí M5 pro možnost většího utahovacího momentu a lepšímu jištění lanových svorek. Lana jsem nejprve upevnil na stožár, a pak je postupně upevňoval do jednotlivých napínáků. Jako konzervaci lan před nepříznivými účinky počasí jsem je šetrně natřel použitým motorovým olejem včetně očnic a lanových sponek tak, aby z nich olej neskapał na zem. Časem se ukázalo, že tato povrchová úprava byla nedostačující. Proto byla lana ošetřena nátěrem řídkého mazacího tuku. Při této práci jsem olejem ošetřil i stožár v jeho vnitřní části.

3.6 Instalace gondoly

Při instalaci vlastního zařízení VE do stožáru jsem se hned v počátku potýkal s problémem. Otočný čep byl se stožárem složen a spasován v době, kdy obě tyto součásti nebyly natřeny ochrannými nátěry proti korozi, proto nebylo z počátku vůbec lehké tyto dvě součásti do sebe spasovat. Pomohlo až namazání obou dílů mazacím tukem a mírný poklep kladivem. Čep a stožár jsem tedy složil přesně podle značek, které jsem si na obou součástech vyrazil důlčkem po jejich výrobě a prvním pasování ještě na zemi, proto nebyl problém ve vzájemném spojení a zajištění těchto dílů třemi připravenými šrouby M8 o patřičné délce.

Po zajištění elektrického propojení jednotlivých pólů a buzení mi již nic nebránilo v připevnění směrového kormidla-ocasu a dále jednotlivých listů budoucího rotoru. Jednotlivé listy rotoru jsem nastavoval podle svých konců tak, aby byly natočeny zpočátku asi 10 stupňů po předpokládaném proudění větru, neboť jsem si zatím nebyl úplně jistý celkovou funkčností rotoru. Všechny listy jsem zajistil pečlivým dotažením šroubů M8 v rotorové hlavě. Posledním krokem při instalování zařízení VE bylo připevnění malé provizorní stříšky nad alternátor. Drží ji šroubovina M6, která byla dodatečně pro tyto potřeby dovařena do rámu zařízení.

3.7 Vztyčení a úpravy

Zařízení bylo už kompletní a nic nebránilo jeho prvnímu zkušebnímu zdvižení. Ještě však před tímto samotným úkonem jsem ze zařízení gondoly demontoval klínový řemen z důvodu záběhu hlavního hřídele a jeho ložisek.

Velkým překvapením při samotném vztyčování pro mě byla potřeba velké síly pro postavení zařízení. Za provaz, který byl uvázan do oka pomocného vytyčovacího ramene stožáru, tahali dva lidé a ani tato síla nestačila k postavení stožáru do své svislé polohy. Po veliké fyzické námaze se mi ale podařilo zařízení vztyčit a zajistit druhým čepem do stojanu stožáru. Ihned potom následovalo pečlivé ukotvení stožárových lan. Díky slabému větru se začal rotor VE ihned po svém postavení pomalu otáčet. Všiml jsem si také lehké deformace čepu kormidla, která vznikla z vodorovného přetížení tohoto dílu při vztyčování stožáru VE.

Prohnutí držáku kormidla mělo za následek to, že kormidlo ve svém základním postavení směřovalo mírně jinam než mělo a stavělo tak rotor nevýhodně do větru. Při větším poryvu větru též došlo k vychýlení kormidla způsobené regulací, ale konstrukce kormidla se již nevrátila do své základní pozice. Na vině tohoto nedostatku byla špatně dimenzovaná pružina vratného mechanismu. Zařízení se postupně po několika poryvech větru dostalo do sklopené polohy a bylo tedy naprosto vytočeno ze směru větru. Po zjištění těchto prvotních závad jsem zařízení spustil za pomoci kladky a malotraktoru na zem a začal jsem jednotlivé závady odstraňovat.

Držák kormidla byl srovnán a k jeho bokům byly navařeny dostatečně velké výztuhy tak, aby byl profilovaný a nově opatřen ochrannými nátěry. Po zpětné montáži jsem ještě na zemi dostatečně prověřil jeho novou pevnost. Pružina mechanismu vracení směrového kormidla byla nahrazena jinou s větším průměrem vlastního drátu a větší tažnou silou, kterou jsem zhotovil jejím zkrácením. Při těchto pracích jsem se také rozhodl přestavět náběhy listů vrtulí a to tak, že konce vrtulí byly nyní nastaveny na úhel přibližně 3 stupně od roviny rotoru tak, jak doporučuje odborná literatura. A také jsem doplnil zařízení o klínový řemen, který jsem dostatečně napnul.

Znovu jsem vztyčil zařízení za pomoci kladky a malotraktoru, tento způsob stavění stožáru se mi velmi osvědčil díky své fyzické nenáročnosti, proto jsem ho od této chvíle používal. Po opětovném postavení jsem si všiml počáteční neochoty rotoru k roztočení. A dále také toho, že u nové pružiny vracejícího mechanismu jsem nastavil malé přepětí v základní poloze, takže se kormidlo nevrací do své výchozí polohy. Proto jsem opět VE sklopil a pružinu přepnul více. Listy rotoru jsem vrátil do náběžného úhlu asi 10 stupňů od roviny rotoru. Všiml jsem si též toho, že při minulé montáži spodního čepu, který zajišťuje stožár ve svém stojanu došlo k velmi silnému poškození kabelu uvnitř stožáru a musel jsem tedy zdlouhavě a ke své zlobě první díl kabelu po své celé délce od vlastního zařízení alternátorů až po skříň se svorkami vyměnit. Kabel jsem později dostatečně zajistil tak, aby k této nešťastné události nemohlo nikdy dojít a při každé montáži spodního čepu na své místo vždy kontroluji správné uložení kabelu ve stožáru.

Při dalším vztyčení stožáru fungovalo vše na VE k mé radosti tak, jak mělo. Rotor se i v relativně malém větru začal otáčet a s ním i zařízení alternátorů, které bylo nyní již poháněno nainstalovaným klínovým řemenem.

Při instalaci zařízení VE na své místo a následném vztyčení jsem odhalil mnoho drobných nedostatků, které uvádím v předešlých řádcích textu. S těmito „dětskými“ prvotními problémy jsem však dopředu počítal, protože při takové neprověřené stavbě vždy dojde z mé zkušenosti k drobným finálním problémům, které se musí vyladit.

3.8 Elektrická instalace

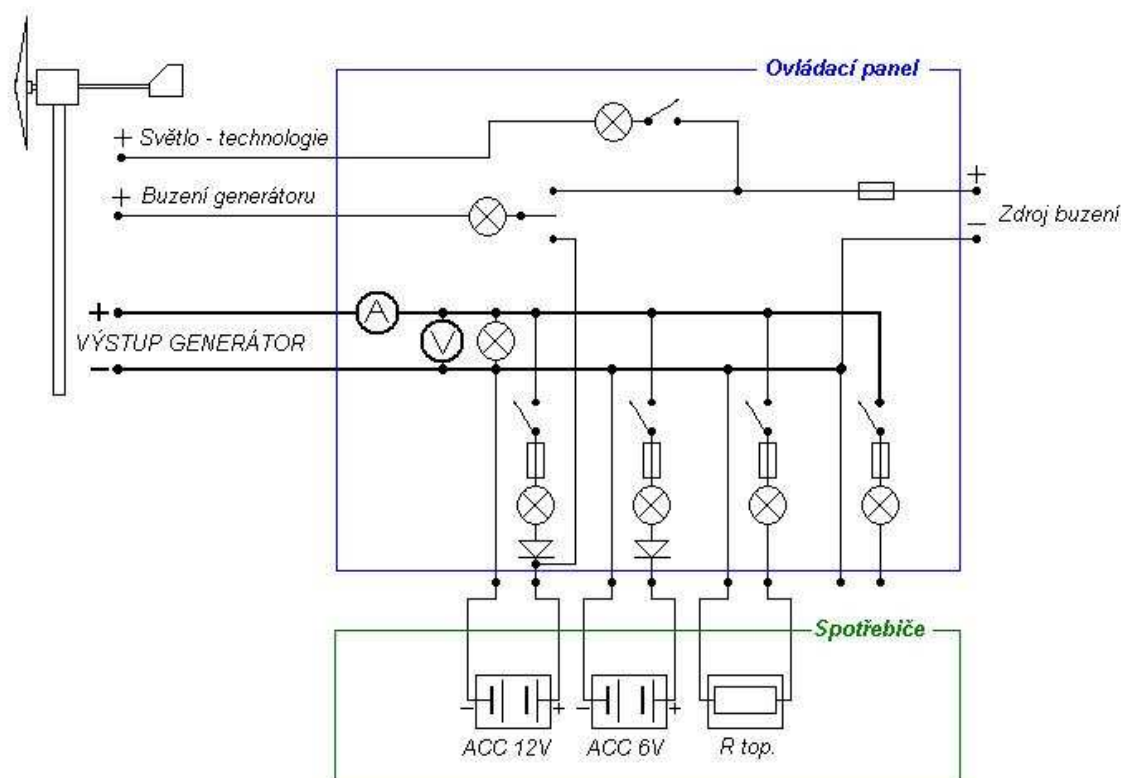
Dále následovala montáž elektrické instalace a výběr příslušného kabelu pro transport vyrobené energie k ovládacímu místu VE, které se nachází asi 15 m vzdušnou vzdáleností od místa elektrárny. Neměl jsem ovšem k dispozici kabel o dostatečné délce a tak jsem použil 2 různých kabelů. Prvním kabelem se stal klasický gumový čtyř-žilový lankový kabel s průměrem jedné žíly 3 mm, známý jako „motorový kabel“. Tento kabel byl protažen stožárem a později při instalaci zařízení spojen pomocí automobilových kontaktů 6,3 mm a kabelových oček 6 mm se zařízením dle navrženého schématu obr.3-1. Kabel byl zajištěn do předem připraveného oka na zařízení gondoly pomocí hadicové sponky. Na opačném konci u základu stojanu nádrží končí kabel ve výšce 1 m nad zemí, kde se nachází malá elektrická skříň s příslušnou svorkovnicí. Tento způsob přechodů obou kabelů jsem zvolil z důvodu, že VE se díky neustálému střídání směrů vanoucích větrů postupně otáčí kolem své osy a tím po určité době způsobí nakroucení kabele. To může být dle mnou používané literatury i o 10 otáček za půl roku provozu.

V takových případech tedy stačí jeden z kabelů uvolnit ze svorkovnice a ručně ho stočit zpět do své původní polohy.

Jako druhý vodič jsem zvolil PVC kabel jedenácti-žilový, drátový, měděný a s průměrem jednoho drátu 1,25 mm. Jiný kabel jsem bohužel neměl k dispozici, proto jsem budoucí ztráty kabelu způsobené malým průřezem kompenzoval zdvojením hlavního + a – pólu. Zbylé žíly kabelu využiji do budoucna jako osvětlení zařízení nebo pro monitorovací zařízení VE. Kabel jsem po montáži na jeho místo a vyřešení průchodu do ovládací budovy vhodně rozlišil, protože nebyl dostatečně barevně značen a pečlivě si označil jednotlivé póly. Dále jsem na konec PVC kabelu, který končil v ovládacím místě – dílně, přidělal svorky k propojení s malým provizorním ovládacím panelem.

3.8.1 Elektrické schéma zapojení konstrukce VE

Větrnou elektrárnu jsem po jejím prvotním postavení připojil k provizornímu ovládacímu panelu, který jsem narychlo zhotovil z dřevěné překližky a potřebných vodičů a spínačů. Tento panel umožňoval budit ze dvou odlišných zdrojů a měl jeden spínaný výstup. Díky své jednoduchosti sloužil ve zkušební době elektrárny velmi dobře. Nevyhovoval ovšem z hlediska bezpečnosti a malým množstvím spínaných výstupů. Proto jsem se po plném zprovoznění elektrárny rozhodl postavit „pořádný“ ovládací panel. Nejprve jsem sehnal panel, který dříve sloužil jako elektrické varhany a ten pro moje potřeby dostatečně upravil a dále osadil patřičnými součástkami, dle následujícího schématu obr. 3-1.



Obr. 3-1: Kompletní elektrické schéma zapojení VE

Nový panel obr. 3-2 nyní obsahuje vhodně dimenzovaný ampérmetr, voltmetr - ten je prozatím nahrazen pouze externím multimetrem. Obsahuje spínač buzení, osvětlení technologie elektrárny a dále 4 spínače výkonových výstupů. Každý spínač má největší přípustný spínaný proud 15 A. Ke každému spínači náleží kontrolní žárovka. Výkonové výstupy panelu jsou navíc vybaveny trubičkovými pojistkami o hodnotě 10 A. Touto pojistkou je také vybaven vstup externího zdroje buzení, ale s menší hodnotou 8 A. Instalací pojistek se vyvarují případného poškození generátoru a jeho diodového usměrňovače, které by mohlo vzniknout zkratem na některém ze spotřebičů. Jako konektory pro výkonové výstupy jsem použil starší typ automobilových zástrček, který je dostatečně dimenzován pro přenos vysokých proudů. Dva výkonové výstupy jsou určeny výhradně pro nabíjení akumulátorů, proto jsem je vybavil jednosměrnými výkonovými diodami s malým úbytkem napětí z důvodu zamezení zpětného vybíjení akumulátorů. Použité akumulátory jsou olověné. První je na napětí 12 V s kapacitou 40 Ah. Druhý je motocyklový 6V, 8 Ah. Tento šesti-voltový dobíjím pouze když má generátor malé otáčky a není schopen vyrobit napětí vyšší než 10 V. Hlavním spotřebičem je ale odporové topné těleso s hodnotami 24 V, 250 W. To spolehlivě hřeje již od napětí 5 V a dlouhodobě slouží po montáži chladiče k vytápění skleníku, který sousedí s dílnou kde je panel nainstalován. Poslední čtvrtý výstup slouží pouze jako rezervní, používám ho pro připojení osvětlení místnosti žárovkou 12V, 40 W.



Obr. 3 -2: Konečná podoba ovládacího panelu VE

3.9 Uvedení do provozu, zkušební doba

Po instalaci VE na své stanoviště a elektrickém propojení jsem uvedl elektrárnu do zkušebního provozu. Zpočátku jsem se v prvních dnech provozu potýkal s nedostatečnou silou větru, která měla za následek pozvolné zastavování rotoru po nabuzení některého z alternátorů. V této době jsem tedy alespoň proměřil velikosti jednotlivých budících proudů. Zjistil jsem tím, že budící proudy jsou o velikosti 2,5 (35 A alternátor) a 3,6 A (120 A alternátor). Přemýšlel jsem tedy nad tím, jestli by nešla tato poměrně velká hodnota nějakým způsobem zmenšit alespoň pro prvotní nabuzení alternátoru. Později se již alternátor může budit proudem, který sám vyrobí.

Další období zkušebního provozu s sebou přineslo vítr, zpočátku velmi nepravidelný a nárazový. Při proměřování příkonu a výkonu v tomto období jsem zjistil, že převod elektrárny je nedostatečně navržen v oblasti nižších otáček rotoru. Alternátory začínaly dobíjet až při rotorových 60 otáčkách za minutu, což se mi z provozního pohledu vůbec nelíbilo, protože pro dosažení těchto otáček je třeba již poměrně silnějšího větru. Rovněž jsem v této době zjistil z charakteristiky daného převodu, že maximální otáčky rotoru zjištěné za toto období byly přibližně 160 otáček za minutu. Při těchto otáčkách však již rotor vykazoval velmi velké vibrace a kyvy se stožárem v důsledku jeho dynamického (vodorovného) nevývážení.

Původně jsem se totiž domníval, že alternátory vyrábí elektrickou energii již při nepatrném roztočení, což se ukázalo jako mylná informace. Alternátory sice tento proud vyrábí, ale jeho amplituda je velmi malá, a proto v podstatě nejde ani usměrnit na proud stejnosměrný. Podle katalogových údajů výrobců alternátorů začíná většina alternátorů dobíjet až po překonání 800-1000 otáček za minutu. Můj převod realizovaný z původní neinformovanosti na zařízení VE byl realizován s poměrem 1:5 a ukázal se pro hodnotu dobíjecího proudu naprosto nedostačující.

Jeden z alternátorů, ten menší s hodnotou maximálního dobíjecího proudu 35 A, jsem tedy po tomto zjištění nahradil silnějším 55 A typem. Ten bez problému pasoval do svého držáku. Tento alternátor ze své charakteristiky začíná dobíjet při o něco menších otáčkách než jeho menší typ. Větší typ alternátoru s hodnotou maximálního dobíjecího proudu 120 A jsem ponechal nainstalovaný na zařízení, pouze jsem zmenšil průměr jeho skládací plechové řemenice. Při jejím skládání jsem do ní vložil podložku o patřičném průměru. Po této úpravě jsem musel znovu vystředit řemenici alternátoru k řemenici umístěné na hlavní hřídeli z důvodu minimalizace ztrát. U druhého typu alternátoru - menšího - nebylo možné nějak litinový odlitek upravit. Nabízelo se jeho osoustružení na menší průměr. Bohužel je tento odlitek ale již tak dostatečně odlehčen, takže by při jeho dalším obrábění mohlo dojít k odlomení stěn řemenice při jeho pozdějším styku s klínovým řemenem. Zmenšováním průměrů řemenic se také zmenšuje hodnota opásání obou alternátorů. Doporučená nejmenší míra opásání, při které je zaručen přenos výkonu řemene na řemenici, je podle norem 90 stupňů a při dalším zmenšování řemenic bych tuto hodnotu již nedodržel. S menším opásáním se vyskytne i další problém. Tím je silné namáhání samotného klínového řemene na ohnutí a to s sebou přináší i další ztráty na celkovém výkonu obou generátorů v důsledku snížení velikosti přenášených otáček.

Po těchto úpravách na alternátorech a částečném zvýšení převodového poměru u většího alternátoru, který nyní dosahoval hodnoty 1:6, jsem dosáhl toho, že alternátory začínaly dobíjet již při svých 600 otáčkách za minutu, což odpovídá přibližné hodnotě 100 dosaženým otáčkám na hřídeli rotoru.

Tento první dobíjecí proud byl ovšem velmi malý – řádově do 1 A a nestačil tedy ani na pokrytí budícího proudu jednoho alternátoru. Skutečně začínaly alternátory nabíjet při dosažení hodnoty 150 otáček za minutu na hřídeli rotoru, ale pro dosažení této hodnoty

již bylo znovu potřeba relativně silného větru a úpravy na nastavení ocasní regulace. Rotor již při těchto otáčkách rozkmitával svojí nevyvážeností celý stožár elektrárny, což nebylo vůbec přijatelné. Tento fakt potřeby již relativně silného typu větru pro výrobu elektřiny se mi ani v této situaci příliš nezamlouval. Rotor bylo totiž možno trvale bez jeho zastavení budit díky jeho velikosti menším alternátorem již při stálém větru a otáčkách rotoru 30 za minutu. Při těchto otáčkách nebyl alternátor schopen dodávat ještě ani minimální výkon. Proto jsem začal přemýšlet nad řešením této situace s nevhodným převodovým poměrem. Na první pohled bylo vidět, že by rotor vzhledem ke svému průměru 2,6 m těžším převodem bez problémů otočil, ovšem problémem bylo, jak tento převod se svým ideálním poměrem 1:15 vzhledem ke své velikosti realizovat.

Elektrárnu jsem tedy koncem měsíce listopadu 2006 demontoval a zkoušel jsem několik drobných vylepšení. Jasným cílem při tom bylo se stávajícím převodem zvýšit otáčky alternátoru, což znamenalo minimalizaci všech možných ztrát. Nejprve jsem tedy odstranil jeden z alternátorů a ponechal pouze jediný. Důvodem k tomuto úkonu bylo také to, že na větším 120 A alternátoru se začal projevovat hluk z patrně opotřebovaných ložisek a i to, že tento alternátor začínal uspokojivě dobíjet až při překonání 1300 otáček za minutu. Tento fakt vyšel z měření všech mých dostupných alternátorů, které jsem v této době provedl pomocí roztáčení na soustruhu. Dále jsem se pokusil o pečlivé vyvážení celého rotoru. Staticky to nebyl problém, rotor jsem měl zavěšen v pomocném středu a jednotlivým natáčením jsem zjišťoval postupně hmotnosti jednotlivých lopatek a ty pak podle toho posouval v růžencovém středu. Problémem je však stále dynamické nevyvážení. A to tím, že nemám možnost celý rotor vyvážit. Mírným zlepšením v tomto směru by mohlo představovat vyvážení svařence středu rotoru za pomoci vyvažovačky na kola automobilů. Nejlepším řešením by ale bylo vyvážení rotoru jako celku, což ale s jeho velikosti průměru skoro 3 metry není v současných podmínkách možné. Proto jsem se rozhodl, že v budoucnu nesmí rotor vykazovat otáčky vyšší než 150 za minutu. Tohoto bude vždy dosaženo pečlivým nastavením regulace ocasního kormidla.

Po těchto menších úpravách a převodovém poměru 1:6 elektrárna stále nedobíjela uspokojivě. Rovněž se ukázal problém s regulací větru, která v praxi způsobovala to, že po větrném nárazu se rotor velmi vychýlil z ideálního směru větru a tím ztratil hodně svých otáček. Následně se ihned vracel do ideálního směru proudění větru. Později jsem tomuto ději přiřknul název „lovení větru“. V této době mi bylo jasné, že elektrárna musí být ve směru této regulace a převodovém poměru přepracována, proto jsem ji demontoval a měsíc pracoval na jejím předělání.

4 PŘESTAVBY PROVEDENÉ NA VE

4.1 Přestavba regulace proti nadměrným účinkům větru

Prvním krokem této fáze bylo předělání systému regulace ocasního kormidla. Úprava spočívala v posunu celého rotorového náboje elektrárny blíže k jejímu středu stožáru a to přesně o 20 mm. Na rám gondoly bylo nutné přivařit menší ocelové nosníky, které náboj hlavního hřídele posouvají o 15 mm výše z důvodu, že by mi překážela hlava čepu středového ložiska otoče stožáru. Následně byly tyto dvě části znovu svrtány a použity delší šrouby M10. Mírným problémem se po konečné zpětné montáži náboje do rámu ukázalo špatné zaúhlování roviny hřídele náboje rotoru a přiléhajícího rámu. Tento problém byl vyřešen pečlivým obroušením jedné z dosedacích ploch navařeného nosníku.

4.2 Přestavba převodů

Druhým krokem přestavby gondoly byla změna převodového poměru rotoru k alternátoru spojená se zásahem do rámu gondoly. Změnu převodu jsem se rozhodl řešit instalací dvou ozubených kol, která zajišťovala převod 97 zubů ku 13 zubům, což přináší lepší převodový poměr 1:7. Ovšem i tento poměr není příliš vhodný, proto jsem se rozhodl vytvořit k tomuto převodu ještě jeden navazující, který je zajištěn klínovým řemenem a upravenou řemenicí ze starší pračky. Ten zajišťuje převod v poměru 1:2. Výsledný převod této převodovky je pak 1:14. Pro realizaci této převodovky bylo zapotřebí přepracovat rám gondoly a vytvořit osazení pro jednotlivá ozubená kola s potřebou dalšího otočného bodu. Z tohoto důvodu jsem zhotovil další ložiskový náboj, který zajišťuje otáčení hřídele pomocného převodu. Ten je tvořen dvěma ložisky a do nich vsazení hřídele průměru 7 mm, na které bylo vysoustruženo uložení pro jednotlivá kola převodu a pro ložiska.

Při skládání nově vytvořených převodů jsem si dal především pozor na pečlivou souosost jednotlivých kol převodovky. Největší pozornost jsem věnoval ozubeným kolům, která na sebe musela perfektně dosedat. Ozubená kola jsou totiž u většiny převodovek největším zdrojem vznikajícího hluku. Pro dokonalou souosost těchto dílů jsem musel nejprve přesně svrtat pomocné uložení ložisek, a pak ho i správně uchytit do rámu gondoly. K tomu slouží dva šrouby M8, které umožňují ve svých dírách díky mírné vůli i regulaci do sebe zapadajících zubů obou ozubených kol.

Dalším vzniklým problémem bylo vyřešení problému s potřebou nového uložení alternátoru do rámu gondoly. Původní místo uchycení držáku bylo vzhledem k ozubenému převodu velmi nevhodně umístěno, a tak jsem se rozhodl tento díl přepracovat. Nejprve jsem vyřezal z rámu původní držák alternátoru a na jeho místě vevařil dodatečně výtuhu pro uchycení ocasní části, která je velmi namáhána na ohyb především při vztyčování stožáru. V minulosti se mi stalo, že se tento díl právě při vztyčování několikrát lehce ohnul. Na alternátor jsem si přidělal odřezaný držák a za pomoci strojařských pravítek jsem si změřil budoucí umístění alternátoru. Držák jsem v tomto místě po mírných úpravách rámu gondoly nabodoval a po důkladném proměření souososti řemenic i přivařil. Pro spojení těchto řemenic a přenos výkonu jsem použil nový klínový řemen o rozměrech 10x580 mm.

Poslední úpravou bylo přivaření nových a kratších šroubů M6, které slouží jako držáky pro plastovou stříšku. Následovala nová povrchová úprava rámu gondoly. Před touto prací jsem ještě zvažoval případné pozinkování této části, ale vzhledem k časové náročnosti jsem od této úpravy odstoupil. Po těchto úpravách byla gondola celkově menší a působila kompaktnějším dojmem. Nyní již bylo vše připraveno k nové montáži.

4.3 Nová montáž na stanoviště

Při montáži upravené gondoly na stožár se nevyskytly žádné problémy. Pouze jsem 55 A alternátor nahradil menším typem 35 A z důvodu, že jsem se obával, že větší alternátor bude přetěžovat rotor a ten se bude až příliš brzdít až do svého zastavení. Rovněž jsem tak učinil z důvodu „hladšího“ záběhu nových dílů. Tuto montáž jsem prováděl v půlce prosince roku 2006. Mírné obavy jsem též měl z použití mazacího tuku ve všech ložiskových nábojích. Ten, jak je známo, s klesající teplotou tuhne. Z tohoto důvodu jsem na ozubená kola nanesl velmi jemný mazací tuk. Ten by zde měl i do jisté míry tlumit hluk, který vzniká stykovým třením obou ozubení.

Vztyčení jsem provedl pomocí speciálně vyrobeného navijáku pro tyto účely. Ten pro mě zkonstruoval můj otec ze staré dvoustupňové nástrčné převodovky. Tím odpadla potřeba kladky a síly malotraktoru, která byla do této doby potřebná pro postavení celé VE.

Po vztyčení jsem znovu ukotvil za pomoci lan celý stožár. Bohužel v tuto dobu foukal pouze mírný slabý vítr a tak se rotor elektrárny vždy jen mírně roztočil a posléze se zastavil. Díky tomuto faktu jsem přestal mít obavy ze špatného roztáčení rotoru, které by mohlo být způsobeno použitím většího převodového poměru. Při otáčení rotoru bylo slyšet vymačkávání mazacího tuku z ozubeného soukolí. Žádný další hluk způsobený například ozubeným soukolím jsem tehdy nepostřehl.

5 ZHODNOCENÍ PROVOZU ELEKTRÁRNY PO PŘESTAVBĚ

5.1 Naměřené hodnoty

Elektrárnu jsem po její přestavbě znovu vztyčil 22.12.2006. První měření jsem provedl až dne 31.12.2006, kdy byl první větrný den. Z naměřených hodnot jsem vypracoval tabulku – platí pro alternátor 12 V, 35 A.

rychlost větru [m/s]	přibližné otáčky rotoru [ot./min.]	otáčky generátoru [ot./min.]	proud dodávaný generátorem [A]	napětí při zátěži topným tělesem 250 W [V]
0 - 2	0	0	0	0
4	20	280	0,5	2
5	45	630	1	5
6,5	60	840	3	9

Obr. 5-1: Tabulka naměřených hodnot 1. část

Tento den bohužel silnější vítr nefoukal, otáček rotoru 70 za minutu bylo dosahováno pouze krátkodobě a v podobě nárazu větru. Topné těleso se zahřívalo pouze tak, že se dalo udržet v ruce. Použití dalšího spotřebiče bylo vyloučené.

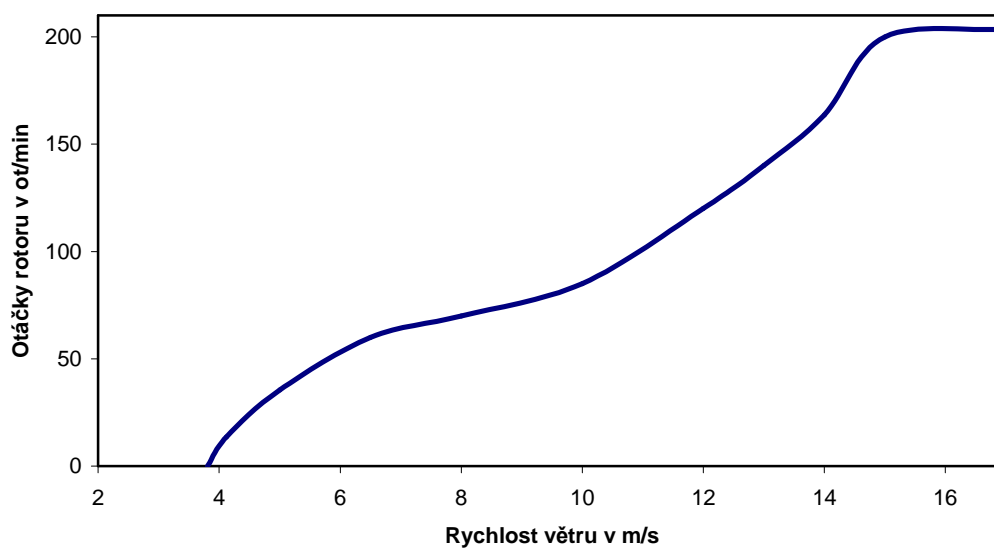
Následující měsíce (leden, únor roku 2007) by se daly označit jako měsíce vichřic a přinesly s sebou dostatečně silný vítr, který dokonale prověřil všechny díly větrné elektrárny. Především regulaci proti nadměrným účinkům větru, která byla často při vichřicích nastavená na svém dorazu – v režimu „přežití elektrárny“. Začátkem ledna jsem tedy mohl rozšířit předešlou tabulku o další hodnoty.

rychlost větru [m/s]	přibližné otáčky rotoru [ot./min.]	otáčky generátoru [ot./min.]	proud dodávaný generátorem [A]	napětí při zátěži topným tělesem 250 W [V]
8	70	980	4	10
10	85	1176	6	12
12	120	1680	8	16
13	140	1960	10	neměřeno
14	160	2240	15	neměřeno
15	200	2800	20	neměřeno
17	200	2800	20	neměřeno

Obr. 5-2: Tabulka naměřených hodnot 2. část

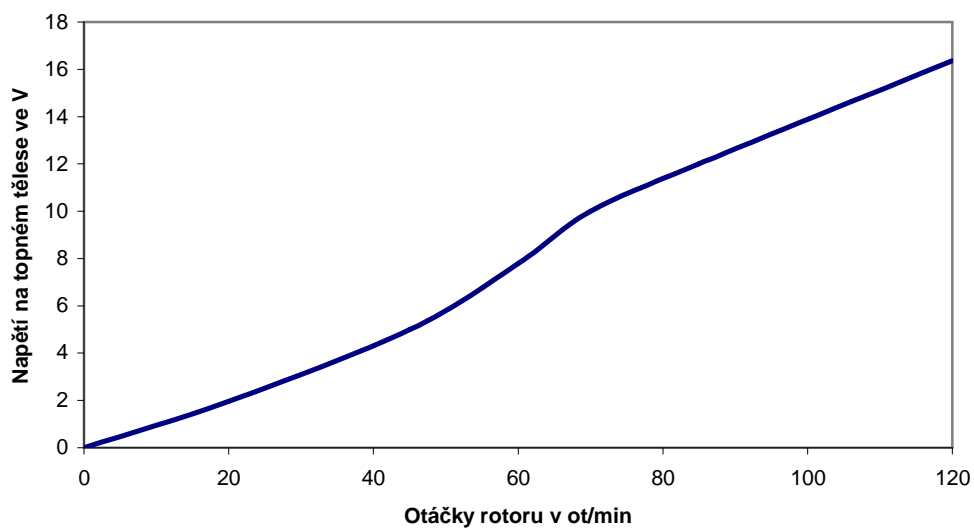
V posledních 4 případech již velmi vysokých hodnot rychlosti větru, není možno změřit napětí při zapojeném topném tělese, došlo by totiž vlivem velkého napětí na usměrňovacích diodách v alternátoru k jejich trvalému zničení. V těchto případech je potřeba připojit k výstupům ovládacího panelu další zátěž a tím napětí alternátoru vhodně snížit. Ideální provozní napětí je mezi 8 – 13 V. Záleží při tom především na použitém spotřebiči. Např. pro potřeby dobíjení akumulátoru 12 V, 40 Ah volím napětí 12 – 15 V a dobíjecí proud 5 - 8 A. Z hodnot jsem vypracoval následující grafy.

Závislost otáček rotoru na rychlosti větru



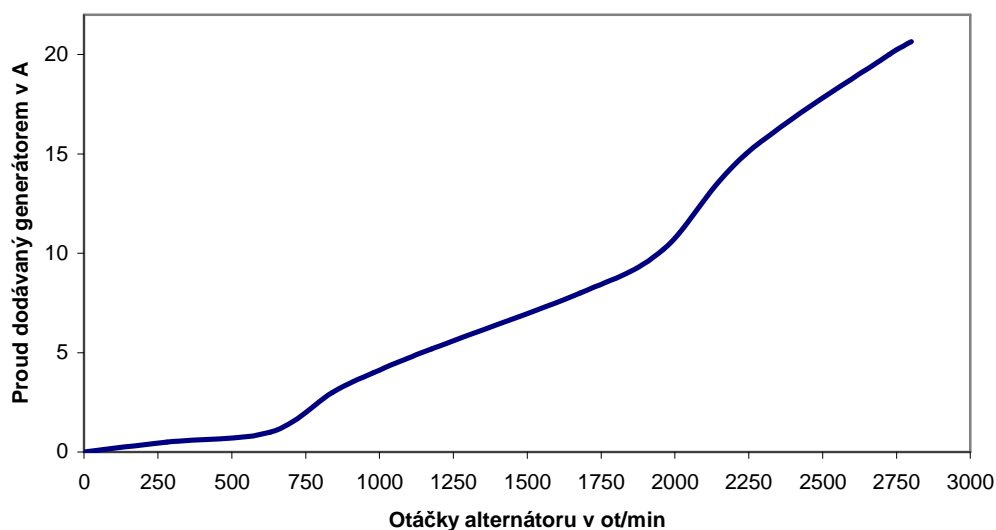
Obr. 5-3: Graf závislosti otáček rotoru na rychlosti větru.

Závislost napětí topného tělesa na otáčkách rotoru



Obr. 5-4: Graf závislosti napětí topného tělesa na otáčkách rotoru.

Charakteristika použitého alternátoru v jeho nízkých otáčkách



Obr. 5-5: Graf charakteristiky použitého alternátoru v nízkých otáčkách.

Koncem února 2007 došlo vlivem nedostatečné zátěže alternátoru a vysoké rychlosti větru k poškození diodového usměrňovače alternátoru. Tato porucha se projevila nízkým dobíjecím napětím a proudem. To dosahovalo maximálně 10 V při 5 A. Dále byla závada signalizována zřetelným blikáním kontrolních žárovek ovládacího panelu. Porucha byla odstraněna začátkem března jednorázovou výměnou celého alternátoru za silnější typ 12V, 55A. S tímto alternátorem dosahovala elektrárna většího výkonu především ve vysokých otáčkách rotoru. Výkon se tedy zvýšil asi o 30 W při vyšších otáčkách rotoru než 100 za minutu. Dále se projevil negativní vliv velké budící síly alternátoru na rozběh celé větrné elektrárny. Při malém větru do 5 m/s se elektrárna nedala budit aniž by nedocházelo k jejímu zastavování. Proto bude v nejbližší době alternátor 55 A odstraněn a nahrazen po opravě diodového usměrňovače menším typem. Při dlouhodobém provozu jsem dále také vysledoval fakt, že se na daném stanovišti elektrárny vyskytují především dva typy větru. První je vítr velmi slabý s rychlostí menší než 5 m/s. Pro potřeby výroby elektrické energie mojí elektrárnou je ovšem nevhodný, protože na rotor elektrárny nepřenese potřebný točivý momenty a tedy ani výkon. Druhým případem je vítr silnější až velmi silný s rychlostí přesahující 10 m/s. Při tomto větru a četných nárazech se větrná elektrárna „přetáčí“. Rotor se točí rychleji než jsou jeho nominální otáčky a tím vytváří vibrace a kmity stožáru, které celkově zvyšují hluk celého zařízení.

Další moje úpravy elektrárny tedy povedou k mírnému zvýšení převodu alternátoru a rotoru. Pokusně asi na poměr 1:20 a elektrárnu budu provozovat pouze za silnějšího větru. Tato úprava proběhne v létě v roce 2007. Od této úpravy očekávám přínos ve formě zvýšení výkonu. Určitým negativem bude naopak zvýšení síly větru, která bude potřeba pro rozběh elektrárny. Tento fakt hodlám kompenzovat instalací menšího alternátoru 12V, 35 A.

5.2 Zhodnocení možnosti použití elektrárny pro vytápění

Větrné elektrárny mají jako zdroje energie jednu velkou nevýhodu. Nejsou zdroji stálé a kdykoliv dosažitelné energie. Ve většině případů potřeby elektrické energie - v mém případě pro vytápění dílny, nebo skleníku vítr nefouká. Tento fakt bývá kompenzován tak, že takto malé elektrárny jsou používány ve většině případů jako dobíječe akumulátorů. Z těchto akumulátorů se pak v nevětrných dnech postupně čerpá elektrická energie.

Z vlastní zkušenosti ale mohu říct, že při dobíjení akumulátorů silnějším proudem, dochází k velmi výraznému odpařování jejich elektrolytu, který zároveň v mém případě uniká do vytápěné místnosti. Tento zápach je velmi nepříjemný a zdraví škodlivý. Proto ve většině případů používám větrnou elektrárnu pouze pro topné účely. Pouze při silném větru připojuji k elektrárně i akumulátory z důvodů zvýšení odporové zátěže. Do budoucna se pokusím sehnat více odporových topných těles, případně sám nějaká vyrobit a tím vhodně také zvýšit topný výkon VE. Ten je v současné chvíli vyhovující pouze pro potřeby vytápění skleníku. V místnosti dílny je jeho efekt velmi malý, především z důvodu častého otvírání venkovních dveří a úniku tepla. Velkou současnou nevýhodou je použití pouze jednoho topného tělesa. Toto těleso jsem opatřil hliníkovým a měděným chladičem. A to z důvodů přehřívání materiálu pláště, kdy hrozilo trvalé poškození tělesa.

Navrhl bych tedy VE z výše zmiňovaných důvodů začlenit do systému vytápění domů pomocí oběhových tepelných čerpadel. V tomto případě bych větrnou elektrárnu používal pouze k podpoře vytápění tohoto systému. Elektrárna by tedy topila pouze při větrných dnech a kompenzovala by tak tepelné ztráty způsobené větrem v daném objektu. Tento způsob použití této malé větrné elektrárny se mi zdá jako nejvhodnější a nejekonomičtější.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se snažil postupovat přesně dle jednotlivých bodů zadání. Celkový přínos této práce je pro mě osobně velký. Díky této práci jsem se seznámil s velmi zajímavým a aktuálním odvětvím dnešní energetiky. Konstrukční informace a zkušenosti jsem čerpal především z odborné literatury [1], [2], [3].

Svůj návrh elektrárny bych hodnotil jako vydařený. Vím, že k továrním výrobkům malých větrných elektráren má moje elektrárna daleko. Je to způsobeno především tím, že jsem celou stavbu elektrárny pojal jako nízkonákladovou. Rovněž vhodnost použití automobilového alternátoru jako generátoru elektrického proudu je velice diskutabilní kvůli potřebě značného převodu na rotor VE. Pokud ale porovnám ceny výrobků malých VE prezentovaných na našem trhu, které se pohybují v řádech několika desítek tisíc korun s náklady na mojí stavbu, dojdou k více než vynikajícímu poměru ceny ku výkonu mé vlastní konstrukce VE. Pozitivním hodnocení je také celkový ekologický přínos této stavby.

Kompletní fotodokumentace stavby VE je na internetových stránkách www.vetrnaelektrarna.wz.cz.

Seznam použité literatury

- [1] **Uwe Hallenga:** Malá větrná elektrárna, HEL Ostrava, 2006
- [2] **Horst Crome:** Technika využití energie větru, HEL Ostrava, 2002
- [3] **V. Rychteník:** Větrné motory a elektrárny, Vydavatelství ČVUT Praha, 1997
- [4] **J. Pavelka a kol.:** Elektrické pohony, Vydavatelství ČVUT Praha, 1997

PŘÍLOHY

A1: Vybrané fotografie stavby malé větrné elektrárny



Obr. A1-1: Stojan stožáru ukotvený do svářecího přípravku



Obr. A1-2: Hotová konstrukce stožáru s pomocným vztyčovacím ramenem



Obr. A1-3: Ložiskové náboje



Obr. A1-4: Rotorový střed



Obr. A1-5: Použitý převod 1:7



Obr. A1-6: První podoba rámu gondoly

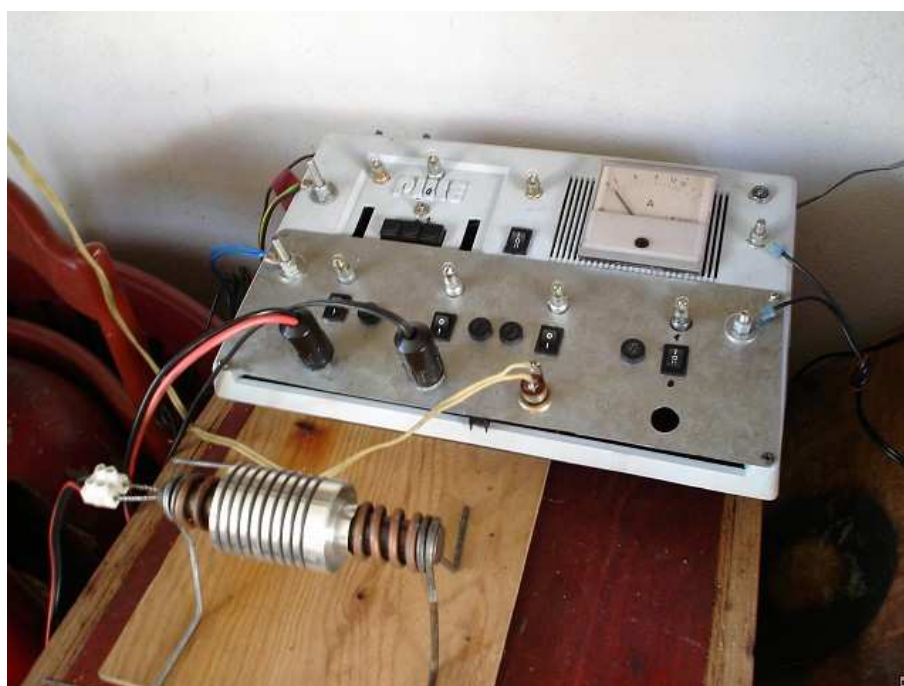


Obr. A1-7: Konečná podoba rámu gondoly po její přestavbě

A2: Fotografie ovládacího panelu



Obr. A2-1: První provizorní ovládací panel



Obr. A2-2: Konečný ovládací panel s topným tělesem

B1: Fotografie malé větrné elektrárny



Obr. B1-1: Větrná elektrárna na svém stanovišti



Obr. B1-2: Pohled ze spodu na gondolu VE a předepsaný způsob kotvení lan stožáru



Obr. B1-3: Pohled na celkové stanoviště VE



Obr. B1-4: Pohled na rotor VE



Obr. B1-5: Pohled na gondolu zdola



Obr. B1-6: Večerní pohled



Obr. B1-3: Pohled na sklopený stožár VE